

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-143416

(P2001-143416A)

(43) 公開日 平成13年5月25日 (2001.5.25)

(51) Int.Cl.⁷

G11B 21/10

識別記号

FI

G11B 21/10

テーマコード(参考)

W

審査請求 未請求 請求項の数43 OL 外国語出願 (全 70 頁)

(21) 出願番号 特願2000-287299(P2000-287299)

(22) 出願日 平成12年9月21日 (2000.9.21)

(31) 優先権主張番号 09/406247

(32) 優先日 平成11年9月24日 (1999.9.24)

(33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 591179352

クワンタム・コーポレーション

QUANTUM CORPORATION

アメリカ合衆国、95035 カリフォルニア
州、ミルピタス、マッカーシー・ブールバ
ード、500

(72) 発明者 リチャード・エム・エアリック

アメリカ合衆国、95070 カリフォルニア
州、サラトガ、マリーラ・ドライブ、
12092

(74) 代理人 100064746

弁理士 深見 久郎 (外5名)

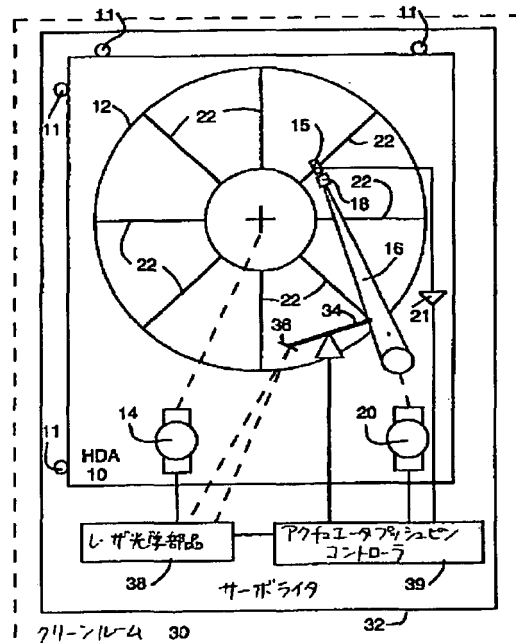
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 磁気ハードディスクドライブおよびトラック位置をサーボライトするための方法

(57) 【要約】

【課題】 ディスクドライブ製造中にディスクドライブがサーボステーションで費やす時間を低減する。

【解決手段】 磁気ハードディスクドライブをサーボライトするための方法は、クリーンルーム環境内のヘッドディスクアセンブリに結合されるサーボライタを用いることによって第1のサーボバーストパターンをサーボライトするステップと、サーボライタを用いることなしに第1のバーストパターンを読出すことによって第1のバーストパターンに対して半径方向にオフセットされる少なくとも第2のサーボバーストパターンをセルフライトするステップと、サーボライタを用いることなしに第1のバーストパターンおよび第2のバーストパターンを用いることによって最終のバーストパターンをセルフライトするステップとを含む。



1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 ヘッドディスクアセンブリの磁気ハードディスクの記憶表面のトラック場所をサーボライトするための方法であって、

ハードディスクアセンブリに結合されるサーボライタを用いることによって第1のサーボバーストパターンをセルフライトするステップと、

サーボライタを用いることなしに第1のバーストパターンを用いることによって最終のサーボバーストパターンをセルフライトするステップとを含む、方法。

【請求項2】 サーボライタを用いることなしにヘッドディスクアセンブリのヘッドで第1のバーストパターンを読み出し、サーボライタを用いることなしに第1のバーストパターンおよび第2のサーボバーストパターンを用いることによって最終のサーボバーストパターンをいくつかのトラック場所にセルフライトすることによって、第1のバーストパターンのバーストエッジに対して半径方向にオフセットされた円周バーストエッジを有する第2のサーボバーストパターンを、記憶表面のいくつかのトラック場所にセルフライトするステップをさらに含む、請求項1に記載の方法。

【請求項3】 第1のサーボバーストパターンおよび第2のサーボバーストパターンの半径方向に中間の円周エッジに位置する円周バーストエッジを有する第3のサーボバーストパターンを記憶表面の前記いくつかのトラック場所にセルフライトするステップをさらに含む、前記いくつかの場所に最終のバーストパターンをセルフライトするステップは、第1のバーストパターン、第2のバーストパターンおよび第3のバーストパターンを用いることによって実行される、請求項2に記載の方法。

【請求項4】 第1のサーボバーストパターンおよび第3のサーボバーストパターンの径方向に中間の円周エッジに位置する円周バーストエッジを有する第4のサーボバーストパターンを記憶表面の前記いくつかのトラック場所にセルフライトするステップをさらに含む、前記いくつかの場所に最終バーストパターンをセルフライトするステップは、第1のバーストパターン、第2のバーストパターン、第3のバーストパターンおよび第4のバーストパターンを用いることによって実行される、請求項3に記載の方法。

【請求項5】 第1のサーボバーストパターンをサーボライトするステップは、クリーンルーム環境内に位置するサーボライタステーションで実行され、最終のサーボバーストパターンをセルフライトするステップは、クリーンルーム環境の外の場所で実行される、請求項1に記載の方法。

【請求項6】 サーボライトするステップの後に続いてドライブ電子回路基板をヘッドディスクアセンブリに取付けかつ接続し、回路基板のドライブ電子部品を用いてクリーンルーム環境の外のセルフスキュンステーション

2

でドライブセルフスキュン中にセルフライトステップを実行するさらなるステップを含む、請求項5に記載の方法。

【請求項7】 セルフサーボライトするステップより前に、セルフサーボライト制御ルーチンをドライブ電子部品にダウンロードするさらなるステップを含む、請求項6に記載の方法。

【請求項8】 サーボライタを用いることによって少なくとも1つの基準トラックをサーボライトするさらなるステップと、少なくとも1つの基準トラックをセルフリードしてヘッドディスクアセンブリの特性を決定するさらなるステップとを含む、請求項1に記載の方法。

【請求項9】 少なくとも1つの基準トラックをサーボライトするステップは、ヘッドディスクアセンブリの記憶ディスクの半径方向範囲にわたって複数の基準トラックをサーボライトするステップを含み、少なくとも1つの基準トラックをセルフリードするステップは、複数の基準トラックをセルフリードするステップを含む、請求項8に記載の方法。

20 【請求項10】 読出素子が回転アクチュエータヘッドポジションの角度位置の関数として書込素子に対する位置的オフセットを明示するように、ヘッドディスクアセンブリは、書込素子よりも小さい幅を備える読出素子を有するデュアル素子読出／書込ヘッドを位置決めするための回転アクチュエータヘッドポジションを含み、特性を決定するステップは、角度位置の関数としてリーダ対ライタのオフセットを決定するステップを含む、請求項8に記載の方法。

30 【請求項11】 ヘッドディスクアセンブリの最終のサーボセクタバーストパターンは、第1のバーストパターンおよび最終のバーストパターンを含む、請求項1に記載の方法。

【請求項12】 ヘッドディスクアセンブリの最終のサーボセクタバーストパターンは、第1のバーストパターンのトリミングされていないバーストA、B、CとトリミングされていないバーストD、EおよびFを含むトリミングされていない6個のバーストのパターンを含み、各バーストは、バーストパターン内のあらゆる他のバーストから半径方向にオフセットされる、請求項11に記載の方法。

40 【請求項13】 各データトラックは、 $\{(C-A)-(D-E)\}=0$ の関係に従って記憶表面上に名目的に中心点を見出す、請求項12に記載の方法。

50 【請求項14】 サーボライトするステップの後に続いてドライブ電子部品回路基板をヘッドディスクアセンブリに取付けかつ接続し、回路基板のドライブ電子部品を用いてクリーンルーム環境の外のセルフスキュンステーションでドライブセルフスキュン中にセルフライトするステップを実行するさらなるステップを含み、ドライブ電子部品は、セルフサーボライトの後に続くドライブ動

作中のトラック追従動作を実行する際に請求項11に述べた関係を計算する、請求項13に記載の方法。

【請求項15】 ドライブのヘッドは、書込素子および読出素子を含み、書込素子は、トラック幅の約3分の2の書込幅を有し、ヘッドディスクアセンブリの最終のサーボセクタバーストパターンは、トリミングされていないバーストA、B、C、D、EおよびFを含むトリミングされていない6個のバーストのパターンを含み、各バーストは、3分の1トラックピッチ分バーストパターン内のあらゆる他のバーストパターンから半径方向にオフ

セットされる、請求項1に記載の方法。

【請求項16】 トリミングされていないバーストA、BおよびCは、サーボライトするステップで記録され、バーストD、EおよびFは、セルフライトするステップで記録される、請求項15に記載の方法。

【請求項17】 書込素子対読出素子のオフセットを決定するさらなるステップを含み、ドライブは、書込素子幅または読出素子幅を決定することなしに、A-Bバースト中心線またはB-Cバースト中心線を追従することによって書込素子対読出素子のオフセットを決定した後、3分の1トラックピッチ間隔で最終のサーボバーストパターンをセルフライトする、請求項16に記載の方法。

【請求項18】 書込素子は、公称トラック幅の66%と120%との間の範囲に存在する電気的な幅を有し、読出素子は、公称トラック幅の35%と75%との間の範囲に存在する電気的な幅を有する、請求項17に記載の方法。

【請求項19】 ヘッドディスクアセンブリに結合されるサーボライタを用いることによって第1のサーボバーストパターンをサーボライトするステップは、各データトラックごとに2回のサーボトラック書込通過があるように、ディスクの記憶表面上に規定されるデータトラックのデータトラックピッチの1.5倍のサーボトラックピッチを有するサーボトラックを漸進的に書込むことによって実行される、請求項1に記載の方法。

【請求項20】 サーボライタを用いることによって第1のサーボバーストパターンをサーボライトするステップは、表面にデジタルサーボデータを書込むステップをさらに含む、請求項1に記載の方法。

【請求項21】 表面にデジタルサーボデータを書込むステップは、第1のサーボバーストパターンを書込むステップの直前に実行される、請求項20に記載の方法。

【請求項22】 サーボライタを用いることなしに第1のバーストパターンを用いることによって最終のサーボバーストパターンをセルフライトするステップは、特定のデータトラック場所でディスクの複数の回転にわたって反復可能ランアウトエラーを決定し、バースト補正値を計算しかつ与えて、最終のサーボバーストパターンをセルフライトしている間決定された反復可能ランアウト

エラーを最小限にするステップを含む、請求項1に記載の方法。

【請求項23】 サーボライトするステップの後に続いてドライブ電子部品回路基板をヘッドディスクアセンブリに取付けかつ接続するステップと、回路基板のドライブ電子部品を用いて、クリーンルーム環境の外のセルフスキンステーションでドライブセルフスキンスキャン中にセルフライトするステップを実行するステップとを含む、最終のサーボバーストパターンをセルフライトする間バースト補正値を計算しかつ与えるステップを含む、請求項22に記載の方法。

【請求項24】 サーボライトするステップの後に続いてデジタルコンピュータをヘッドディスクアセンブリに接続し、セルフライトするステップを実行するためにデジタルコンピュータを用いるステップを含み、最終のサーボバーストパターンをセルフライトする間バースト補正値を計算しかつ与えるステップを含む、請求項22に記載の方法。

【請求項25】 デジタルサーボデータおよび第1のサーボバーストパターンを表面に書込むステップは、デジタルサーボデータの第1および第2のサーボの組と第1のサーボバーストパターンとを表面に書込むステップを含み、最終のバーストパターンは、第1および第2のサーボの組の他方内にセルフライトされ、サーボの組の前記一方をオーバーライトするさらなるステップを含む、請求項1に記載の方法。

【請求項26】 スピンドルモータによって回転させられる少なくとも1つのデータ記憶ディスクと、誘導性書込素子および磁気抵抗性読出素子を含みヘッドポジションナによってディスクの記憶表面上に規定される半径方向トラック場所に位置決めされるヘッドトランスデューサとを含み、ディスクドライブは、ヘッドトランスデューサに接続される書込/読出チャンネルを含み、さらに、スピンドルモータを駆動するためのスピンドルモータと、ヘッドポジションナを駆動するためのポジションナドライブと、外部計算環境にドライブを接続しキャッシュバッファを含むインターフェイスと、少なくともヘッドポジションナを制御して選択されたデータトラックにヘッドトランスデューサを位置決めするためのドライブコントローラとを含む磁気ハードディスクドライブであって、ディスクドライブは、製造プロセスの一部としてサーボライタによって記憶表面の少なくとも一部上に記録される基準サーボパターンを有し、基準サーボパターンは、最終製品のパターンについて不完全であり、ディスクドライブは、基準サーボパターンに応答して記憶表面にわたって埋込まれたサーボの最終製品のパターンをセルフライトするためにドライブによって実行されるセルフサーボライトソフトウェアを含む、磁気ハードディスクドライブ。

【請求項27】 基準サーボパターンは、サーボライタ

の直接の制御下でヘッドトランスデューサの書込素子によって記憶表面上に記録される、請求項26に記載の磁気ハードディスクドライブ。

【請求項28】 基準サーボパターンは、トラックからトラックへと実質的に位相コヒーレントであり、デジタルトラック数情報を含むデジタルトラック情報フィールドを含む、請求項26に記載の磁気ハードディスクドライブ。

【請求項29】 基準サーボパターンは、円周的にシーケンシャルであり半径方向にオフセットされる基準サーボパーストの反復するパターンを含む、請求項26に記載の磁気ハードディスクドライブ。

【請求項30】 書込素子は、読出素子の磁気的な読出幅よりも広い磁気的な書込幅を有し、基準サーボパーストは、単一のトラックピッチ内のいくつかのしかしすべてではない半径方向の場所についてデータトラックに対するセンタリング情報を与える、請求項29に記載の磁気ハードディスクドライブ。

【請求項31】 磁気的な書込幅は、公称トラック幅の66%と120%との間の範囲に存在し、磁気的な読出幅は、公称トラック幅の35%と75%との間の範囲に存在する、請求項30に記載の磁気ハードディスクドライブ。

【請求項32】 ヘッドポジションナは、回転アクチュエータを含み、ディスクドライブセルフサーボライトソフトウェアは、ディスクドライブに、基準サーボパーストを参照することによって中間サーボパーストをセルフライトさせ、中間サーボパーストを参照することによって最終製品のサーボパーストパターンをセルフライトさせる、請求項31に記載の磁気ハードディスクドライブ。

【請求項33】 ディスクドライブは、ユーザデータ場所に中間サーボパーストをセルフライトし、セルフサーボライトソフトウェアは、ディスクドライブに、その後のディスクドライブのユーザデータ記憶および取出し動作中にユーザデータで中間サーボパーストを上書きさせる、請求項32に記載の磁気ハードディスクドライブ。

【請求項34】 基準サーボパーストは、ディスクドライブによってセルフライトされた最終製品のサーボパーストパターン内に含まれる、請求項31に記載の磁気ハードディスクドライブ。

【請求項35】 ディスクドライブによってセルフライトされた最終製品のサーボパーストパターンは、隣接するデータトラックの各対ごとに、パーストA、B、C、D、EおよびFのトリミングされていない6個のサーボパーストのパターンを含む、請求項31に記載の磁気ハードディスクドライブ。

【請求項36】 ディスクドライブコントローラは、ヘッドポジションナに、 $\{(C-A) - (D-E)\} = 0$ の関係に従ってデータトラックの中心上にヘッドトランスデューサを位置決めさせる、請求項35に記載の磁気ハ

ードディスクドライブ。

【請求項37】 ディスクドライブは、各ヘッドトランスデューサを独立して位置決めするためのマイクロアクチュエータを有するデュアルステージアクチュエータを含み、ディスクドライブコントローラは、ヘッドポジションナおよび各マイクロアクチュエータを別個に制御する、請求項26に記載の磁気ハードディスクドライブ。

【請求項38】 埋込まれたサーボパターンを規定する記憶表面を有する磁気データ記憶ディスクと、公称トラック幅の66%と120%との間の範囲の磁気的な書込幅を有する磁気書込素子および、公称トラック幅の35%と75%との間の範囲の磁気的な読出幅を有する磁気抵抗性読出素子を含むヘッドトランスデューサと、記憶表面上にさらに規定される同心円状のデータ記憶トラックに対してヘッドトランスデューサを位置決めするためのヘッドポジションナとを含み、埋込まれたサーボパターンは、パーストA、B、C、D、EおよびFのトリミングされていない6個のサーボパーストのパターンを隣接するデータトラックの各対ごとに含む、ディスクドライブ。

【請求項39】 トリミングされていないサーボパーストA、BおよびCは、ディスクドライブ製造プロセス内のサーボライタの直接の制御下の間に磁気書込素子によって表面に書込まれ、トリミングされていないサーボパーストD、EおよびFは、サーボライタステップの後に続いてドライブセルフスキャン動作中にディスクドライブによってセルフライトされる、請求項38に記載のディスクドライブ。

【請求項40】 ディスクドライブは、回転ヘッドポジションナを含み、データ記憶表面に対するヘッドトランスデューサの半径方向の位置に起因する書込素子/読出素子のオフセット角度を補償するためにトリミングされていないサーボパーストD、EおよびFをセルフライトするより前に、パーストA、BおよびCを参照することによってサーボパーストd、eおよびfの中間の組をセルフライトする、請求項39に記載のディスクドライブ。

【請求項41】 サーボパーストd、eおよびfの中間の組は、それぞれパーストA、BおよびCの約16.7%の半径方向オフセットでディスクドライブによってセルフライトされ、サーボパーストD、EおよびFは、それぞれパーストd、eおよびfの約16.7%の半径方向オフセットでディスクドライブによってセルフライトされる、請求項40に記載のディスクドライブ。

【請求項42】 埋込まれたサーボパターンは、サーボパーストに隣接して先行するデジタルトラック情報フィールドをも含み、そのデジタルトラック情報フィールドは、トラックからトラックへ実質的に位相コヒーレントであり、読出素子によって読出されるデジタルトラック数情報を含む、請求項38に記載のディスクドライブ。

【請求項43】 ディスクドライブは、各ヘッドトラン

スデューサを独立して位置決めするためのマイクロアクチュエータを有するデュアルステージアクチュエータと、ヘッドポジショナおよび各マイクロアクチュエータを別個に制御するためのディスクドライブコントローラを含む、請求項38に記載のディスクドライブ。

【発明の詳細な説明】

【0001】この発明は、一般的には、磁気ハードディスクドライブにおけるヘッド位置決めに関する。より具体的には、この発明は、サーボライタを採用して粗い位置基準バーストパターンを記録し、次に、ディスクドライブサーボを採用して粗い位置バースト基準パターンに基づいて最終の細かい位置バースト基準パターンをセルフライトすることによって、磁気データ記憶ディスク上にヘッド位置基準サーボパターンを書込むための方法に関する。

【0002】磁気ハードディスクドライブは、従来には、回転ボイスコイルヘッドポジショナを採用して、トラックシーク動作中に同心円上のデータトラック間でデータトランスデューサヘッドを高速に移動させ、ユーザデータ書込または読出動作中に選択されたデータトラック上にヘッドを維持する。データトランスデューサヘッドは、磁気データ記憶表面上のおよそ1ミクロン以下のところに空気軸受で浮動することによって回転する磁気データ記憶表面に極めて接近して維持される。このようにして、線形データ記憶密度を極めて高くすることが可能である。線形記録密度が実際の限界に近づくと、トラック幅を低減しこれによって直径3.5インチなどの標準の製造サイズのディスク記憶表面上に規定可能である同心円上のデータトラックの数を増大させるために、記憶容量を増大させるための別のより最近の傾向は、有効なヘッドの磁気的な幅をさらに狭くしていくことであった。

【0003】ディスク上に記録される識別可能な磁束遷移信号を回復するために、デュアルヘッド構造が採用されてきた。誘導性書込素子がディスク上に磁束遷移を書込むために用いられ、磁気抵抗性または巨大な磁気抵抗性材料の別個の読出素子が、ディスクから磁束遷移を読出すために用いられる。比較的広い書込素子および比較的狭い読出素子を設けることが知られている。実際には、ヘッドがヘッドポジショナによってトラック中心線と正確に位置合わせまたは維持され得ないとしても、より狭い読出素子が、トラックが読出されることを可能とするために、現在のところ好まれている。この緩やかなトラッキング許容差は、ディスクドライブ製品内にあまり複雑でなく高価でないヘッド位置トラッキングシステム（サーボ）を採用することが可能であることを意味する。別個の書込素子および読出素子を使用すると、製造許容差の存在のために、読出および書込のための異なったトラッキングターゲット位置が必要とされる。回転ヘッドポジショナを使用すると、書込対読出のオフセット

（所与のトラック上の書込および読出のための最適なトラッキングターゲット間の半径方向分離）は、記録されたトラックに対するヘッド支持構造（空気軸受スライダ本体）のスキュー角の関数として回転ポジショナのストロークによって明らかに異なっている。任意の特定の位置でのこのオフセット変動は、「書込対読出のオフセット」として知られている。狭い読出素子の欠点の1つは、そのような素子によって、たとえば、その開示がここに引用によって援用される、「ディスクドライブヘッドポジショナのためのエッジサーボ」（“Edge Servo for Disk Drive Head Positioner”）と題するR. ムーン（R. Moon）に付与され、同一人に譲渡された米国特許番号第5,170,299号に記載されるパターンなどの、従来のバーストパターンとともに使用されると、データトラックの半径方向幅にわたるすべての位置での良好な位置エラー信号（「PES」）を得ることが困難になることである。この欠点は、アクチュエータストロークにわたる各トラックごとに、実際の中心に対して実質的にすべての半径方向ヘッド位置に利用可能なPESを与える特殊なサーボバーストパターンを与え、使用することを必要とする。

【0004】デュアルヘッド構造の書込素子および読出素子は、特に回転ボイスコイルアクチュエータがデュアル素子ヘッドを位置決めするために用いられるときに、ある位置的なオフセットを有する可能性がある。回転アクチュエータによって、書込素子と読出素子との間の位置上のオフセットは、ディスク表面に対するヘッドトランスデューサおよびアクチュエータの回転ストロークにわたって異なる。

【0005】データトラックは、互いにきわめて接近しておかれる（ディスク半径方向1インチ当たり、1000から20000トラック以上の高トラック密度）ので、ヘッド位置サーボループが、典型的には、ヘッドポジショナを制御するためにディスクドライブ電子部品の一部として設けられる。ヘッド位置情報をサーボループに与えるために、各磁気記憶表面は典型的には、記録されたサーボ情報を担持する。この情報は、時に「楔」または「スポーク」と呼ばれる、ユーザデータセクタまたはセグメント間の狭いサーボセクタの円周連続として各データトラック内に最も頻繁に「埋込まれる」。サーボ情報は、典型的には、トラックシークおよび粗い位置決め動作中に用いられるある位相コヒーレントのあるデジタル情報を含み、細かい位置情報は、典型的には、特定のトラックからの読出およびこれへの書込動作中にヘッドトラッキングのために用いられるバーストパターンの形状をとる。ディスクドライブ製造プロセスにおけるサーボライトするステップ中に、一旦書込まれると、サーボセクタはその後、ディスクドライブコントローラ論理によって、ディスクの記憶表面の「リードオンリ」と呼ばれる領域の上書から保護される。ヘッドがサーボセ

クタ位置を通過すると、粗いおよび細かい位置情報は、ヘッドによってサンプリングされ、このサンプリングされた情報は、トラックシークおよびトラック追従動作中のヘッド位置決め装置の閉ループ制御のために、ディスクドライブのサーボ制御ループに与えられ、これによって使用される。

【0006】正確に書込まれたサーボ情報を与えるために、典型的には、データベースの干渉計技術を採用する非常に正確なサーボライト機器が、大気微粒子汚染が厳しく制御されているドライブ製造施設の「クリーンルーム」内で採用されている。クリーンルームは、ディスクドライブは典型的にはその内側が周囲環境にさらされてサーボライトされるために、必要とされる。レーザ干渉計サーボライトは、ディスクドライブのアクチュエータ位置を正確に測定する。この正確に測定された位置に基づいて、回転ボイスコイルアクチュエータなどのドライブヘッドポジショナが、サーボライトの制御下でトラックからトラックへ移動され、各データヘッドが、関連づけられたデータ記憶表面にサーボ情報を書込む。一旦、サーボパターンが書込まれると、これはリードバック処理によってテスト可能であり、一方で、ドライブは、サーボパターンが有効かつ正確に書込まれたことをベリファイするためにサーボライトステーションに留まる。サーボライト制御下で1トラックあたり3回の通過でサーボバーストを書込むことが知られている。しかしながら、各ディスク表面上に多数のトラックがあれば、サーボバースト書込プロセスは非常に時間がかかり、したがって非常に高価になる可能性がある。

【0007】ディスクドライブサーボライトおよびサーボライト技術の典型例は、「磁気ディスク上にサーボ信号を書込むための方法および同方法によって記録されたサーボパターンを有する磁気ディスクを備える磁気ディスクドライブ」(“Method for Writing Servo Signals onto a Magnetic Disk and Magnetic Disk Drive Equipped with Magnetic Disk(s) Having Servo Pattern Recorded by the Method”)と題するセオ(Seo)に付与された米国特許番号第5,748,398号と、「制御装置、ステージ装置および堅固な安定補償器を含むハードディスクサーボライト装置」(“Control Apparatus, a Stage Apparatus and a Hard Disk Servowriter Apparatus Including a Robust Stabilizing Compensator”)と題するサトー(Sato)に付与された米国特許番号第5,726,879号と、「被覆されたデータ記憶システムのためのサーボ情報記録方法および装置」

(“ServoInformation Recording Method and Apparatus for an Enclosed Data StorageSystem”)と題するマレック(Malek)に付与された米国特許番号第5,627,698号と、「磁気ディスクドライブをサーボライトするためのシステムおよび方法」(“System and Method for Servowriting a Magnetic Disk Drive”)と題

するジェームス(James)らに付与された米国特許番号第5,339,204号とに提供され、その開示は、ここに引用により援用される。サーボライトに共通する特徴の1つは、これらがディスクドライブ製造プロセスにおける資本設備の非常に複雑かつ高価なアイテムであることである。サーボライトおよび関連するクリーンルームのコストは、各ディスクドライブが製造されサーボライトされる限界原価負担として償却されなければならない。

10 【0008】基準ディスクの表面上にサーボパターンをサーボライトで書込むことが提案されてきた。基準ディスクをディスクドライブスピンドル上に設置することについて、基準サーボパターンを用いて、埋込まれたサーボパターンをディスクドライブ内の他の記憶表面上に書込む。そのような方策は、「ESPER-2ハードディスクドライブサーボライトのアーキテクチャおよび性能」(“Architecture and Performance of the ESPER-2 Hard-Disk Drive Servowriter”)と題する、IBM誌研究開発(IBM J. Res. Develop.)、第37巻、第1号、1993年1月、第3〜11頁の記事においてH.オノ(H. Ono)によって記載される。オノによって記載される方策の欠点の1つは、サーボライト上の基準ディスクの回転の中心が、ディスクドライブ内の基準ディスクの回転の中心に対応しない可能性があり、半径方向および接線次元における非反復可能ランアウトエラーが、ディスクドライブ内の異なったディスク間で異なることである(接線トラッキングエラーは、サーボ情報の位相コヒーレンスに干渉し、位相コヒーレントのデジタルサーボ情報フィールドについてのサーボクロック速度に対して制約を課す)。

30 【0009】データ記憶ディスク表面は、媒体欠陥または異常を含む可能性があるため、複数のサーボパターンセットを書込んでから誤りのないセットを選択する一方で他のセットを上書(消去)することが提案されてきた。この方策は、「ディスクドライブのためのセルフバリフィケーションを伴う複数のサーボセクタセット書込」(“Multiple Servo Sector Sets Write With Self-Verification for Disk Drive”)と題するゾンペル(Sompel)らに付与され、同一人に譲渡された米国特許番号第5,553,086号に記載され、その開示はここに引用により援用される。

40 【0010】既に述べたように、埋込まれたサーボ情報は、典型的には、特定のデータトラックを追従するために用いられた固定の周波数で記録されたある細かい位置バーストがあとに続くあるデジタルデータを含む。デジタルデータは、望ましくは、トラックからトラックへ位相コヒーレントであり、このため、これはトラックシーク動作中に読出可能であり、サーボシステムが2トラック間をトラック追従する間に読出されることも可能である。細かい位置バーストは、円周上シーケンシャルであ

り、半径方向にオフセットされ、このため、ヘッドがバーストセットの一部を通過すると、一部のバースト振幅サンプルが読出される。これらの振幅サンプルは、サーボシステムによって比較され使用されてPESを生成し、読出および書込が実行される際、トラック追従動作中にヘッド位置を制御する。特定のトラック位置でのデュアルヘッド構造の読出素子と書込素子との間のオフセットまたは読出対書込のオフセットのために、マイクロジョギング動作を採用して適切なヘッド位置決めを行なってもよい。比較的広い誘導性書込素子および比較的狭い磁気抵抗性読出素子を含むヘッドトランスデューサを有するディスクドライブであって、ヘッドトランスデューサが回転ボイスコイルアクチュエータをマイクロジョギングすることによって位置決めされるディスクドライブは、「ディスクドライブのための磁気抵抗性読出／誘導性書込ヘッド構造のための埋込まれたサーボセクタを含むデータトラックパターン」(“Data Track Pattern Including Embedded Servo Sectors for Magneto-Resistive Read/Inductive Write Head Structure for a Disk Drive”)と題する、トンザット(Ton-that)に付与され、同一人に譲渡された米国特許番号第5, 587, 850号に例示されかつ記載され、その開示はここに引用により援用される。

【0011】サーボライトの後に、クリーンルーム環境内に留まっている間、ディスクドライブヘッドディスクアセンブリ(「HDA」)は、外部の微粒子汚染を防ぐために封止される。HDAが封止されクリーンルームから出された後、電子回路基板がHDAに接続され、ドライブの物理的アセンブリを完成する。この段階で、完全に組立てられたディスクドライブは、バーンインラックまたはセルフスキャンステーションに送られ、ここでこれは典型的には、一定の時間期間にわたって連続的に作動され、また典型的には、ある一定範囲の温度にわたって作動され、信頼性を保証する。また、セルフスキャン中に、ドライブは、ある種のセルフスキャン動作を行ない、ヘッドおよび記憶ディスクの信頼性および特徴と、媒体欠陥の位置などの、自己についてのある種の事実および特徴とを発見し明らかにする。これらのデータは次に、典型的には、ディスクドライブの確保されたトラック上に記録され、ドライブの性能を維持し制御するためにその後に通常のディスクドライブ動作中に用いられてよい。また、セルフスキャン中に、ある構成および動作上のファームウェアおよびソフトウェアが、ディスクの確保されたトラックに転送され、その後に、通常のドライブデータ記憶および取出動作中に埋込まれたディスクドライブコントローラによって使用されてもよい。

【0012】1ディスク表面当たりのデータ記憶トラックの数(トラック密度)が増大すると、サーボライト精度および書込時間は比例的に増大する。クリーンルームのドライブ製造環境において高価なサーボライトの数を

無制限に設けることは理論的には可能であるが、実際には、限られた数のサーボライトのみが利用可能であり、サーボライトする時間は、より新しいディスクドライブ設計が何千ものデータトラックを有する記憶表面を含むとき特に、製造のボトルネックとなり得る。また、多数の製造サイクルにわたって所与の書込精度のサーボライトを利用し、各サイクルが典型的には増大したトラック密度を明示することが望ましいであろう。

【0013】バーンインまたはセルフスキャンラックは、サーボライトよりも遥かに安価であり、セルフスキャンラック能力を製造プロセスに加えると、サーボライト能力を加えるよりも遥かに、ドライブの負担コストの上昇は少なくて済む。

【0014】ディスクドライブをサーボライトするコストを低減するための提案の1つは、高価なクリーンルームからサーボライトを出すことを必要とする。この方策は、陽圧配置のディスクドライブのクロックヘッドポートに清浄な空気を注入し、注入された空気がサーボライトブッシュピンポートにドライブを排出することによるなどの、局所化された空気浄化および清浄を必要とする。これはクリーンルームよりも安価な方策であるが、高価なサーボライト装置をなおも必要とし、ディスクドライブ内部に入る微粒子汚染の可能性は、クリーンルーム環境を使用することによるよりも遥かに高い。

【0015】いくつかのセルフサーボライト方法およびアルゴリズムが、サーボライトのコストおよび不都合を全般的に回避するために提案されてきた。そのような方策の1つは、「ディスクドライブをセルフサーボライトするためのシステム」(“System for Self-Servowriting a Disk Drive”)と題するスウェアリンゲン(Swe aringen)らに付与され同一人に譲渡された米国特許番号第5, 668, 679号に記載され、その開示はここに引用により援用される。他の例は、「ディスクドライブのセルフサーボライトおよび方法」(“Self-Servowriting Disk Drive and Method”)と題するクリブ(Cri bbs)らに付与された米国特許番号第5, 448, 429号と、「ディスクドライブ上にサーボトラックを書込むためのブートストラップ方法」(“Bootstrap Method for Writing Servo Tracks on a Disk Drive”)と題するクリブらに付与された米国特許番号第5, 541, 784号と、「使用可能なダイナミックレンジ内に基準レベルを維持するステップを含むセルフサーボライトのための方法およびシステム」(“Method and Systems for Self-Servowriting Including Maintaining a Reference Level Within a Usable Dynamic Range”)と題するチェイナ(Chainer)らに付与された米国特許番号第5, 757, 574号と、「ダイナミックエラー伝搬低減を伴うセルフサーボライトシステム」(“Self-Servowriting System with Dynamic Error Propagation Reduction”)と題するチェイナらに付与された米国特許

番号第5, 793, 554号と、「セルフサーボライティングファイル」(“Self-Servowriting File”)と題するブラウン(Brown)らに付与された米国特許番号第5, 570, 247号と、「埋込まれたサーボトラック追従システムおよびサーボトラックを書込むための方法」(“Embedded Servo Track Following System and Method for Writing Servo Tracks”)と題するオリバー(Oliver)らに付与された米国特許番号第4, 414, 589号とに見出され、その開示は、ここに引用により援用される。

【0016】完全なセルフサーボライトが非常に望ましい目標であるが、実際には、ヘッド幅、利得、整列、記憶媒体特性および質などの、所与の製造許容差を実現することは非常に困難である。簡単に言えば、セルフサーボライト処理はこれまで、データ記憶表面にわたってトラックからトラックへの位相がコヒーレントであるデジタルサーボ情報を提供し、1インチあたり20, 000トラックにすぐに近づきつつある現在のデータトラック密度に対する線形PES値を与えるために必要とされるサーボバーストのための十分に正確な位置決めを確立する際に、ディスクドライブ大量生産における問題があることがわかっている。そのような高トラック密度は、より正確に書込まれるサーボ基準パターンを必要とするだけでなく、広帯域幅サーボ制御ループを必要とする。広帯域幅サーボループは、たとえば、デュアルステージアクチュエータを使用することによって実現可能である。磁気ヘッドアーム内の圧電デバイスを採用するデュアルステージアクチュエータは、「細かいヘッド変位のためのサブアクチュエータを備えるディスクシステム」

(“Disk System with Sub-Actuators for Fine Head Displacement”)と題するモリ(Mori)らに付与された米国特許番号第5, 189, 578号に記載され、その開示はここに引用により援用される。

【0017】したがって、ディスクドライブが、サーボライタ環境外でコヒーレントなパターンを書込む必要なしに、ドライブバーンイン中に非常に高いデータトラック密度をサポートする埋込まれたサーボバーストパターンをセルフサーボライトすることを可能にする一方で、実際のサーボライタ時間を最小限にするサーボライト処理の必要がこれまでのところ未解決のまま残されている。

【0018】この発明のある目的は、先行技術の限界および欠点を克服するような態様で、ディスクドライブがディスクドライブ製造中にサーボライタステーションで費やす時間を低減することである。

【0019】この発明の別の目的は、サーボライタ環境内の基準パターン書込の後のセルフサーボライトプロセス中に、ディスク振動に起因するものなどのある種の望ましくないパターンアーティファクトを除去することによって、製品のサーボバーストパターンの品質を向上さ

せることである。

【0020】この発明のさらなる目的は、先行技術の限界および欠点を克服するような態様でサーボライタの支援によって書込まれた基準サーボパターンに基づいて磁気ハードディスクドライブをセルフサーボライトするための方法を提供する。

【0021】この発明のさらに別の目的は、ディスクドライブ製造プロセスにおいてサーボライタを採用して、位相コヒーレントのデジタルサーボ情報および基準バーストパターンを記録し、次に、完成したディスクドライブを用いて、拡張セルフスキャン動作中に基準バーストパターンから得られるより詳細かつ包括的なサーボバーストパターンをセルフライトすることである。

【0022】この発明の関連する目的として、サーボライタは、初期のトリミングされていない、2トラックバーストパターン当たり3個のバーストを書込み、ディスクドライブは、書込対読出のオフセットが決定される限り、書込素子幅または読出素子幅を決定することなしに、初期の2トラックバーストパターン当たり3個のバーストを追従することによって、3分の1トラックピッチ間隔で製品バーストパターンを書込む。

【0023】この発明のあるさらなる目的は、最も高いまたは最新のトラック密度レイアウトまたは設計に匹敵するようサーボライタをアップグレードする必要なしに、各世代が、先行の世代から増大したトラック密度を有するようなディスクドライブ製品の多数の世代にわたるサーボライタの有効寿命を延長することである。

【0024】この発明のさらにもう1つの目的は、十分なPES直線性を備えるサーボフォーマットを発生し、サーボライタの時間を増大することなしに、ライタ幅(たとえば、トラックピッチの40%未満)に対する非常に狭い磁気抵抗性読出素子の使用を可能にすることである。

【0025】この発明のさらに別の目的は、高価なサーボライタ環境からそれほど高価でないドライブセルフスキャン環境内のディスクドライブにディスクドライブサーボライト動作のかなりの部分を移動させて、費用があまりかからず信頼性がより高いディスクドライブを得ることである。

【0026】この発明のさらに別の目的は、ファミリーの各ディスクに、各ドライブ内の特定のヘッド特性に従って最終の埋込まれたサーボバーストパターンの少なくともかなりの部分を各記憶表面上にセルフライトさせることによって、クリーンルームのサーボライタの製造上の活用を最適化するような態様で、広いリーダー/ライタ許容差を特徴とするヘッドを有するハードディスクドライブのファミリーをサーボライトすることである。

【0027】この発明の原理に従って、ヘッドディスクアセンブリの磁気ハードディスクをサーボライトするための方法は、ディスクドライブ製造作業においてサーボ

ライトステーションでのヘッドディスクアセンブリに結合されるサーボライタを用いて基準サーボバーストパターンをサーボライトするステップと、製造作業において電子基板をヘッドディスクアセンブリに取付けかつ接続することによってディスクドライブのアセンブリを完成するステップと、完成したディスクドライブをバーンインラックに転送するステップと、あるセルフサーボライト制御ソフトウェアをディスクドライブに転送し、バーンインラックにおいてディスクドライブを動作させて、サーボライタによってヘッドディスクアセンブリに書込まれた基準バーストパターンを用いることによって最終のサーボバーストパターンの少なくとも一部をセルフライトするステップとを含む。これに関して、ディスクドライブは、ディスクドライブの回転ポジションからの書込対読出のオフセットを考慮するために、最終のサーボバーストパターンをセルフライトするために用いられる中間サーボバーストパターンをセルフライトしてもよい。

【0028】この発明の関連する局面では、磁気ハードディスクドライブは、スピンドルモータによって回転せられる少なくとも1つのデータ記憶ディスクと、ヘッドトランスデューサであって、誘導性書込素子および磁気抵抗性読出素子を含み、ヘッドポジションによってディスクの記憶表面上に規定される半径方向トラック位置に位置決めされる少なくとも1つのヘッドトランスデューサとを有する。最終的に組立てられると、ディスクドライブは、ヘッドトランスデューサに接続される書込／読出チャンネルと、スピンドルモータを駆動するためのスピンドルドライブと、ヘッドポジションを駆動するためのポジションドライブと、ドライブを外部計算環境に接続しキャッシュバッファを含むインターフェイスと、少なくともヘッドポジションを制御して選択されたデータトラックにヘッドトランスデューサを位置決めするためのドライブコントローラとを含む。この発明のこの例では、ディスクドライブは、製造プロセスの一部としてサーボライタによって記憶表面の少なくとも一部上に記録された基準サーボパターンを有し、基準サーボパターンは、最終製品パターンに関しては不完全である。最終組立の後に、ディスクドライブにはセルフサーボライトのソフトウェアがロードされ、これを実行して、基準サーボパターンに基づいて記憶表面にわたって埋込まれたサーボ最終製品パターンをセルフライトする。基準サーボパターンは、最終製品パターンの一部であってもよく、これは廃棄され上書されてもよい。加えて、比較的広い書込素子の磁気的な幅（たとえば、トラック幅の66～120%）と比較的狭い読出素子の磁気的な幅（たとえば、トラック幅の35～75%）との間の書込対読出のオフセットおよび／または差異を補償するために、中間サーボバーストパターンを、いくつかのトラックについて書込んでよい。セルフサーボライトプロセスにおい

て実行される較正プロセスが、任意の中間サーボバーストパターンの必要性およびその位置を決定する。トラック数情報を含む位相コヒーレントのサーボフィールドがまた、基準サーボパターンおよび最終製品サーボパターン内に含まれてもよい。

【0029】この発明の原理を含むもう1つの例では、ディスクドライブは、埋込まれたサーボパターンを規定する記憶表面を有する磁気データ記憶ディスクを含む。ドライブはまた、公称トラック幅の66%と120%との間の範囲である磁気的な書込幅を有する磁気書込素子と、公称トラック幅の35%と75%との間の範囲である磁気的な読出幅を有する磁気抵抗性の読出素子とを含むヘッドトランスデューサと、記憶表面上にさらに規定される同心円上のデータ記憶トラックに対してヘッドトランスデューサを位置決めするためのヘッドポジションとを含む。この例では、埋込まれたサーボパターンは、隣接するデータトラックの各対ごとに、円周状シーケンシャルで、半径方向にオフセットされるトリミングされていないバーストA、B、C、D、EおよびFからなる6個のサーボバーストパターンを含む。ヘッド幅変動に対する僅かにより少ない許容差を伴う、トリミングされたバーストを採用する、1トラック当り4個のサーボバーストパターンを採用してもよい。しかしながら、同じ通過におけるバーストのトリミングおよび書込の欠点の1つは、各トリミングされたバーストエッジに沿ったランダム性がより少なく、したがって書込反復可能ランアウト（「RRO」）はより高くなることである。この発明のこれらのおよび他の目的、利点、局面および特徴は、添付の図面と関連づけて呈示される好ましい実施例の以下の詳細な記載を考慮すると、より十分に認められ理解されるであろう。

【0030】図1～図2を参照すると、図中、同様の参照文字が図面を通して同様のまたは対応する構造要素を指定し、ヘッドディスクアセンブリ（HDA）10は、磁気被覆または蒸着を担持してその上に規定される同心円上のデータトラックにユーザデータを記憶する少なくとも1つの主表面を有する少なくとも1つのデータ記憶ディスク12を含む。ディスク12は、ディスクスピンドルモータ14によって予め定められた角度速度で回転させられる。データトランスデューサヘッド構造15は、比較的広い書込素子17および比較的狭い読出素子19を担持する空気軸受スライダを含む。書込素子17は誘導性であり、これに対して、読出素子は、磁気抵抗性原理（たとえば、AMR、GMR、またはより進歩したヘッド技術、たとえば「巨大な磁気抵抗」原理）を採用する。ヘッド構造15は、ヘッドアーム16の末端にジンバル装着され、このため、先行技術に公知のとおり、スライダは、空気軸受上をディスク表面のすぐ上（1マイクロインチ以下）を自由に追従する。ヘッドアーム16の近端は、HDA10のベースに軸受して装着

され、回転ボイスコイルアクチュエータモータ20によってディスク表面に対して回転させられる。ヘッドアーム16の末端は、好適なマイクロアクチュエータ18を含んで、これによってデュアルステージのアクチュエータヘッドポジションを実現してもよい。マイクロアクチュエータは、前に参照したモリらによる米国特許番号第5,189,578号に示され、たとえば、「読出/書込ヘッドの軸調整をトラッキングするためのスタックされたコイルマイクロアクチュエータを備えたヘッド懸架」(“Head Suspension with Stacked Coil Microactuator for Tracking Axis Adjustment of a Read/Write Head”)と題するナイト(Knight)らに付与された米国特許番号第5,867,347号にも示される。典型的には、完成したHDAは、プリアンプ、ヘッドセレクト、書込ドライブ集積回路21を含み、これは、リードバック動作中にノイズに対する信号を最大化するために実質的であるほどヘッド15の近くに装着される。

【0031】図1では、組立てられたHDA10は、クリーンルーム30内の、サーボライタステーション32にあり、整列ピン11と位置合わせされて置かれている。HDA10は、ベース壁、側壁またはカバープレートに形成される開口部を含み、サーボライタ32の機械的または仮想的(たとえば光学的)プッシュピン34を受け入れる。プッシュピン34は、アクチュエータアーム16と係合する係合端を有し、別の端は、逆リフレクタ36に結合される。逆リフレクタ36は、レーザビームを、サーボライタ32内のレーザ光学ユニット38に反射し返す。レーザ光学ユニット38は、従来のレーザ干渉計技術を用いて、基準ピン11に対する逆リフレクタ36の正確な相対位置を決定し、これによって、ディスク12に対するプッシュピン34およびアクチュエータアーム16の相対位置を間接的に決定する。この相対位置情報は、アクチュエータプッシュピンコントローラユニット39に供給され、これがプッシュピン34の位置を制御し、これによってサーボライタで支援されるサーボライト動作中にアクチュエータヘッドアーム16の位置を制御する。

【0032】この発明の原理に従って、サーボライタ32は、それぞれ、ディスク12を回転させ、アクチュエータ16(および、デュアルステージアクチュエータが存在しているならばマイクロアクチュエータ18)を位置決めし、位相コヒーレントのデジタルサーボ情報フィールド23およびサーボバーストパターンをディスク12に書込みかつチェックするために、回路21を介してスピンドルモータ14、アクチュエータモータ20およびヘッド15を制御する。半径方向サーボ基準バーストA、BおよびCの初期基準サーボバーストパターン22は、サーボライタ32の制御下でヘッド15の比較的広い誘導性書込素子17によって記録される。サーボライトされると、初期基準サーボバーストパターン22は、

トリミングされていない3つのバーストパターンを含む。書込まれた初期サーボバースト基準パターンは、ヘッド15の読出素子19が、リーダ素子幅およびライタ素子幅に依存して、データ表面上に規定されたいずれか特定のデータトラック内のいくつか、しかしおそらくはすべてではない場所でサーボすることを可能にするのに十分である。最も好ましくは、初期サーボバースト基準パターンは、十分な領域にわたってサーボすることを可能にするための十分な情報を与え、このため中間バーストの単一の組のみが、すべてのトラックについて最終製品サーボバーストを発生するのに必要とされる。しかしながら、ある状況において必要であれば、最終製品サーボバーストパターンを達成するために中間バーストの複数の組を与えることが実質的である。

【0033】初期サーボバーストパターン22がサーボライタステーション32で書込まれた後、HDA10は、(たとえばベース壁、側壁またはカバープレートにおけるクロックトラックヘッド開口部およびプッシュピン開口部に保護性の展着剤を与えることによってなど)大気に対して封止される。封止されたHDA10は次に、クリーンルーム環境からアセンブリステーションへと移動され、そこで、ディスクドライブ電子部品を担持するドライブ回路基板50が、HDA10に装着され電氣的に接続される。ドライブ回路基板は典型的には、読出/書込チャンネル51と、スピンドルおよびアクチュエータモータドライバチップ53と、キャッシュバッファメモリアレイ55と、埋込まれたプログラムされたデジタルマイクロプロセッサコア58およびインタフェース59を含むデジタルコントローラチップ57とを含む。チップ/基板レベルの特定の回路集積に依存して、より多くのまたはより少ないチップが実際には、基板50上に含まれてもよい。

【0034】図2では、ドライブ電子部品プリント回路基板50は、HDA10に取付けられ、プリアンプ21、スピンドルモータ24およびアクチュエータボイスコイルモータ20を介してヘッド15に接続され、読出/書込チャンネル51は、回路21を介してヘッド15の読出素子および書込素子に接続される。構造的に完成したハードディスク100が結果として得られる。完成したディスクドライブ100は次に、セルフスキャンユニット52に移される。セルフスキャンユニット52は、ディスクウェアダウンロードステーション54を含み、セルフサーボライト制御ソフトウェアを含むディスク制御ソフトウェアを、中央コンピュータから確保されたトラック41にダウンロードし、たとえば回路基板50上のドライブのデジタルコントローラによって取出しおよび実行される。これらの確保されたトラック41は、完全にサーボライトされ完成したハードディスク100についてのより容易なコード書込を可能としてもよい。代替的に、ディスク制御ファームウェアが、ドライブの回路基

板50上の電氣的にプログラム可能なリードオンリメモリ内に記憶されてもよく、または、これは、ドライブ電子部品の付加的な部分として含まれる直列ポート設備を介してドライブにダウンロードされてもよい。

【0035】代替的に、特殊な回路基板が、ブリアンプ21、スピンドルモータ14およびアクチュエータボイスコイルモータ20を介してヘッド15に接続されてもよい。この特殊な回路基板は、典型的には、図2に示すディスクドライブ製品回路基板50と関連して識別される機能を含むであろうが、ドライブのセルフサーボライト動作のために特に適合され、したがって典型的には、ドライブ回路基板よりより大きい計算速度および能力が付与され、最終バーストパターンをセルフライトするために、複数のセルフライトされたサーボバーストおよび複数レートのサーボバーストサンプリング技術などの使用を可能とするであろう。最終製品のサーボパターンがセルフライトされた後、特殊な回路基板は切離され、ドライブ回路基板50がインストールおよび接続され、これによってディスクドライブアセンブリを完成するであろう。機能54を介するディスクウェアダウンロードが次に、インタフェース59を介してまたは回路基板50の別個の直列ポートを介して行なわれることが可能であり、またはディスクウェアは、専用の回路基板を介してダウンロード可能である。

【0036】ディスクドライブ100がセルフスキャンユニット52にある間に、バーストd、eおよびf（図9）からなる第2の中間サーボバーストパターン24が、たとえば、測定された書込対読出のオフセットに依存していくつかのトラックについてディスク12上にセルフライトされ得る。組立てられたドライブ100は、数時間の間セルフスキャンステーションに留まることが可能である。後に説明するとおり、セルフスキャンプロセスは、この発明のセルフサーボライトプロセスを実行するために、1ヘッドおよび表面あたり最大1時間以上を必要とするであろう。ディスクドライブ100がセルフスキャンユニット52を離れるまでには、最終サーボバーストパターン25が、各製品サーボセクタ場所でディスク12にセルフライトされてしまっているであろう。

【0037】好ましくは、必ずしもではないが、最終製品サーボバーストパターンを含まない、元々のサーボライトされたおよび/またはセルフライトされた中間サーボバーストパターンは、上書きされるかまたはDC消去されるであろう。なぜなら、これらの元々の/中間パターンは、ドライブサーボ動作に必要とされず、したがって、記憶領域に位置しており、これは後に、通常のディスクドライブ動作中にユーザデータを記憶するために用いられる。また基準トラックパターン40の帯域（図7）およびディスク12の確保されたトラック41上に記憶されるディスクセルフサーボライトソフトウェア

は、ディスクウェアダウンロードプロセス54を介してダウンロードされた制御ソフトウェアで上書きされてもよい。制御ソフトウェアは、通常のディスクドライブデータ記憶および取出し動作中に、ディスクドライブ100による取出しおよび使用のために利用可能となるであろう。制御ソフトウェアのアクティブな部分は、バッファ55の確保されたページ領域内に保持され、ドライブチップ57内のデジタルコントローラコア58によって実行される。

10 【0038】ドライブヘッド位置サーボ制御ループが、各データ記憶表面に書込まれた最終製品の埋込まれたサーボバーストパターンを使用し、特定の表面と関連づけられるヘッド15の読出素子19と、ブリアンプチップ21と、読出/書込チャネル51と、57内のデジタルコントローラコアと、モータドライバチップ53と、ボイスコイルアクチュエータモータ20（およびもしマイクロアクチュエータ18がヘッドアームアセンブリ18の一部として含まれていればマイクロアクチュエータドライバ）とを構造的に含む。当業者には十分理解され、したがってここにはさらに詳細に記載しないが、さまざまなアナログーデジタル変換器およびデジタルーアナログ変換器が、ヘッド位置サーボ制御ループ内に含まれる。

20 【0039】ディスクドライブ設計者が直面する最初の問題は、「トリミングされたバースト」または「トリミングされていないバースト」のいずれを採用するかということである。トリミングされたサーボバーストは、ディスクに対して変位される半径方向位置の書込素子のその後の通過中にバーストの半径方向エッジがDC消去されたものである。トリミングされたバーストパターンは、図3Aに示され、ここではサーボバーストA'が、隣接するバーストC'の上半径方向エッジと整列するようにトリミングされている下部半径方向エッジ（断続線のブロック内に囲まれるバーストの一部がDC消去されている）を有する。C'バーストの書込についてのサーボライト経路に沿った書込トランスデューサ17の一回の通過中に、バーストA'などの、先に書込まれたバーストをトリミングすることが可能である。しかしながら、トリミングされていないバーストパターンを1回の通過でトリミングされたバーストパターンの代わりに用いると、反復可能ランアウトエラー（RRO）は約2の平方根分、低減されることがわかっている。トリミングされていないバーストパターンについてのバーストゼロ点は、2つの異なったサーボライト通過（各バースト書込について1回の通過）の非反復可能ランアウトエラー（NRRO）によって決定され、図3Aに示すようなトリミングされたパターンについてのバーストゼロ点は、1回の通過（この場合、書込素子は1個のバーストをトリミングし、別のバーストを書込む）のNRROによって決定される。図3Aのトリミングされたバーストパタ

ーンは、各バーストごとに2回の通過、すなわち先のバーストをトリミングするための1回の通過とバーストを書込むための第2の通過とを必要とすることによって、 $\sqrt{2}$ だけ、そのRROを低減するように書込みされ得るが、そのような方策は、サーボライタステーション32で費やされるサーボライト時間をほぼ2倍にするであろう。

【0040】図3Bは、A' およびC' のトリミングされたバーストの整列したエッジを通過する中心線(A-C)についてMRリーダ素子19の半径方向オフセットの関数として線形であるPESをグラフで示す。ライタ素子17がトラック幅の約2/3であれば、PES直線性信号は、トリミングされたまたはトリミングされていないサーボバーストについておおよそ同じであるはずである。しかしながら、トラック幅の約2/3よりも大きい電気的な書込幅を有するライタ素子17については、PES曲線の使用可能部分は、トリミングされていないバーストについてより大きい。図3Aおよび図3Bは、2個のトリミングされたバーストA' およびC' についてのMR読出素子19の半径方向変位の関数としてA'-C' バースト振幅差(PES)を示す。図3Bとして表わされる理想化された曲線は、両端が平らな線によって結ばれる線形部分を有する。図3Bの曲線の使用可能部分は単に、曲線の線形部分である。

【0041】図4Aおよび図4Bは、トリミングされていないバーストAおよびCについての等価の状況を示す。(A-C)=0について中心点を見出された図4Bの曲線の線形部分は、トリミングされたバーストパターンのものよりもより小さいが、図4Bの曲線の使用可能な非平坦な部分は、ディスクに対するMR読出素子19のより大きい半径方向変位にわたって延在する。PES線形化方法がドライブサーボループ内でPESを再線形化するため用いられるならば、図4Aのトリミングされていないバーストパターンは、より大きい使用可能領域を有する。

【0042】場合によっては、ディスク12の記憶領域にわたって半径方向に分布する1つ以上の基準トラックの帯域40を設けることが有用であるであろう。図5は、ディスク12の外径(OD)からディスク12の最小使用可能内径(ID)までのたとえば5つのデータトラックゾーンを示す。ODとIDの間には、たとえば基準トラック40の6つの帯域が存在する。たとえば6つの基準トラック40のパターンが、図7に示される。図7には6つの基準トラック40が示されるが、他の数のゾーンおよび基準トラックが採用されてもよく、一般的には、より大きい数のゾーンがより少ない数のゾーンよりも好ましいことが理解される。基準トラック40は、複数の組のバーストを含んでもよく、バーストは、PES信号対ノイズ比を向上させるために、最終製品バーストよりもより長くてもよい。基準トラック40は、

サーボライタ32の支援によって書込まれ、ディスクドライブ100のサーボループが、たとえば、位置誤り信号(PES)利得、ディスクにわたるリーダ対ライタの横オフセット、リーダ対ライタの円周オフセットおよびライタ幅に対するリーダ幅を測定することを可能にする。また、この発明の代替の実現化例として、たとえば、1つ以上のディスクウェアデータトラック41を、一般的にはしかし必ずしもではないが、ディスク12のODにおいてフォーマットしかつ確保して、セルフスキャンステーション52でのセルフサーボライト動作中に必要とされ実行されるであろうドライブディスクウェアを記憶することが实际的である。次に、ドライブ100は、完全にフォーマットされたディスクウェアトラック41と基準トラック40との間に存在するトラックのサーボバーストのすべてをセルフサーボライトして、最終のサーボセクタパターン25を生成する。一旦、PES利得および書込対読出のオフセット測定値が、セルフライトされたサーボバーストパターン26を得るためにとられかつ用いられると、基準サーボトラック40は、通常のデータトラックに変換されることが可能である。なぜなら、完成したディスクドライブ100は、いかなるトラック半径方向位置にも正確にサーボ可能となり、基準トラック40はもはや、ディスクドライブサーボ動作のために必要とされないからである。

【0043】図6は、図1のサーボライタ32および書込素子17の支援によって書込まれた位相コヒーレントのデジタル情報23およびサーボバースト22を含むサーボパターンの一例を示す。4つの公称サーボトラック中心線位置、サーボTk0、サーボTk1、サーボTk2およびサーボTk3が示され、4つの公称データトラック中心線位置、データTk0、データTk1、データTk2およびデータTk3もまた示される。図6の例では、サーボトラック中心線は、データトラックのピッチの3分の2であるピッチを有する。図6の点線の水平線は、3分の1データトラックピッチでの漸進性のヘッド位置軌跡を表わす。各サーボトラックは、この例では各データトラックのピッチの3分の2であるピッチを有する。選択された軌跡は、サーボライタ32の直接の制御下でのトリミングされていないサーボバースト22および位相コヒーレントのデジタル情報23の書込中に、ライタ素子17によって追従され得る。サーボライタの各データトラックの完全なサーボライトは、ライタ素子17の2回の通過を必要とするであろう。しかし、この発明の原理に従うと、必要とされてもよい任意の中間パターンおよび最終パターンのセルフライトのために必要とされる初期バーストパターンを書込むために、1サーボトラックあたり1回のみの通過がサーボライタで必要とされる。実際には、何千もの同心円状のトラックが、典型的には、ディスク12の外径(OD)から内径(ID)まで規定される。

【0044】図6の例では、書込素子17は、各データトラックTkの幅の3分の2よりもわずかに大きく、基準サーボバーストパターン22は最も好ましくは、2つの隣接するデータトラックにわたる3回の通過中に書込まれる3個の「トリミングされていない」サーボバーストA、BおよびCを含む。図10に示される最終のサーボバーストパターンは、1トラックあたり3回通過のトリミングされていない6個のサーボバーストパターンを含む。各最終製品のサーボセクタ25は、好ましくは、サーボライタ支援のデジタルフィールド23と、パターン22のサーボライタ支援のバーストA、B、Cと、パターン26のセルフライトされたサーボバーストD、EおよびFとを含む。代替的に、サーボバーストのすべてが、セルフスキャンステーションでのさらなる時間を犠牲にして、RROを向上させるためにセルフスキャンで再書込されてもよい。

* 【0046】

$$\begin{aligned} w-d-(w/2) &= w-(w-2/3*TW)/2-(w/2) \\ &= w-(w/2)+(1/3*TW)-(w/2) \\ &= 1/3*TW \end{aligned}$$

式中、wは、書込素子幅であり、dは、 $(w-(2/3*TW))/2$ (トリミングされていないバーストパターンを用いるA-B中心線からのオフセット距離)、TWはトラック幅である。

【0047】先行のディスクドライブ設計は、1トラックあたり3回通過のトリミングされた4個のバーストパターンと、1トラックあたり2回通過のトリミングされない4個のバーストパターンとを用いたが、図10に示す最終のサーボパターン25を用いると、薄膜誘導性ライタ素子17および薄膜MRリーダ素子19の両方の幅における最大の起こり得る変動を用いることが可能となることがわかっていく。したがって、図10の最終のサーボパターンを用いることによって、公称トラック幅の66%と120%との間の範囲である電氣的な幅のライタと、公称のトラック幅の35%と75%との間の範囲である電氣的な幅のリーダとが使用可能である(ライタ素子17の幅が常にMRリーダ素子19の幅よりも大きいという付加的な制約を伴う)。1トラックあたり3回通過の方式でトリミングされていないバーストを用いることによる結果の1つは、図10に示される6個の最終のサーボバーストA、B、C、D、EおよびFがすべての起こり得るライタ幅を適応させるために必要とされるということである。

【0048】図10の例では、データトラックの中心線は、以下の関係、 $\{(C-A)-(D-E)\}=0$ を満足させる半径方向点でドライブコントローラ57によって決定されることが注目されるべきである。上述した使用可能範囲内のほとんどのリーダ幅について、これらの関係は通常、書込トラック中心線の近傍における4個のバーストからの情報を含む位置誤り信号(PES)を発生し、その結果、ディスクドライブ100のヘッド位置

* 【0045】この発明の原理に従って、パターン26のセルフライトされたサーボバーストD、EおよびFが、時間のかかるライタ幅決定およびリーダ幅決定を行なう必要なしに、サーボライタ支援のトリミングされていないバーストA、BおよびCから3分の1トラックピッチオフセットでセルフライトされる。この利点は、図8に例示される。この例では、読出素子19は、AおよびBのバーストの等しい相対振幅の中心線軌跡を追従する。図8に例示されるトラック追従位置(書込対読出のオフセットは0である)では、ヘッド16は、サーボライタ支援のトリミングされていないバーストAの上部エッジとして規定されるトラック境界より下に正確に3分の1トラックピッチで書込素子17をおく。セルフサーボライトするバーストDについてのこの望ましいヘッド位置は、以下のように数学的に確立される。

サーボ制御ループ内のRROおよびPES復調ノイズが低減される。非常に狭いリーダ素子を備えるいくつかのヘッドについては、有用な細かい位置情報は、1サーボ楔あたり2個のサーボバーストからのみ利用可能である。これらのより狭いヘッドについては、TMRは悪化するであろうが、そのようなヘッドのオフトラック読出能力(「OTC」)はより良好なものとなるはずである。また、2個のみのバーストが特定のヘッドによって使用可能である場合、そのヘッドによって読出されるトラックのすべてについてのトラック中心は、公称4バーストゼロ点から2バーストゼロ点に移動され得る。

【0049】図10のパターンは、本質的に、各データトラックについて3回の別個の書込を必要とするが、図6の、各点線の水平線あたり1回の書込は、データトラックの3分の2ごとに(点線の水平線2つあたり1回の書込)書込むことによってデジタル情報のすべてならびに第1の3個のバーストA、BおよびCを書込むことが実際的であることを示す。しかしながら、図6に示されるパターンで書込まれたドライブ100は、おそらく、ヘッド位置アクチュエータ16の半径方向のストロークに沿ったすべての位置でうまくサーボすることができないであろう。たとえば、もしMR読出素子19の幅がトラック幅の約50%未満であり、かつ、書込素子17の幅がトラック幅の66%であれば、PESは、Bバーストの中心の近傍において平らな領域または0を有するであろう。リーダ幅、ライタ幅および書込対読出のオフセットのいくつかの組み合わせによって、ドライブは、セルフスキャンで図10の最終サーボパターンのパターン28のD、EおよびFバーストを書込むために十分に正確にサーボすることが可能である。最終のサーボパターンの直接書込が可能である1組の条件は、

- 1) 読出素子の幅がデータトラックピッチの33%より大きく、
- 2) 書込素子の幅がデータトラックピッチの33%未満であり、
- 3) 書込対読出のオフセットがデータトラックピッチの16.7%未満であることである。最初の2つの条件は自由であるが、第3の条件は、すべての動作スキュー角でのすべてのヘッドについて計算するために拘束的なものである。読出/書込オフセットがトラックピッチの16.7%を超えるような状況については、セルフサーボライト動作は、2つのステップで実行される。

【0050】図9に示すとおり、第1のセルフサーボライトステップは、バーストd、eおよびfからなる中間バーストパターン24が、データトラックの+/-16.7%のオフセットで書込まれるようにする。上に列挙した最初の2つの条件が満たされる（最小のリード幅および最大のライト幅を制限する）かぎり、図10に示すパターン26の最終バーストD、EおよびFを書込むために、元のバースト22の2つの隣接する半径方向エッジまたは中間バースト24の2つの隣接する半径方向エッジのいずれかを用いてドライブがサーボする方法が常にある。大きい書込対読出オフセットについては、用いられるサーボバーストは、小さいオフセットについて用いられるバーストと同じでない可能性があることが注目される。

【0051】図3A、図3B、図4Aおよび図4Bに関連して上に説明したとおり、「トリミングされていない」とは、バースト幅が、書込素子17の有効な電気的な幅に対応することを意味し、バースト幅を公称基準幅にトリミングするかまたは調整させるためにバーストエッジをDC消去する試みがなされないことを意味する。単一の半径方向バーストパターン22が図6に示されるが、実際には、複数のサーボバーストが、ディスク12の周りに延在するサーボスポーク内に書込まれることがさらに理解されるであろう。典型的には、特定のディスクドライブ設計上の考慮に依存して、ディスク12上に規定される、90〜150またはそれ以上ものサーボ楔またはスポークが存在し得る。特定のドライブ設計のサーボスポークの数が大きければ大きいほど、サーボバーストの数は大きくなるであろう。

【0052】図6のサーボバーストパターンを書込む間、サーボライタ32のプッシュピン34は、アクチュエータアーム16を案内し、ヘッド15の書込素子17は、基準バースト22の複数のコピーと、たとえば、同期フィールド、サーボアドレスマークフィールド（これは、1回転あたり1個の基準位置をマークするために1セクタ内にインデックスマークを含み得る）、トラック数フィールドおよびサーボ数フィールドを含む、位相コヒーレントのデジタルサーボ情報23の複数のコピーとを書込む。デジタルスポーク情報フィールド23は、ト

ラックからトラックへとコヒーレントであり、任意の特定のデータトラック中心線位置との何らかのヘッドの不整列に関係なく、この情報を、ヘッド15のリーダ19が読出可能であり、読出チャンネル51およびドライブサーボコントローラ57がデコード可能であることを意味する。デジタルスポーク情報23は、トラックシーク動作中にヘッド位置を決定するために必要とされる粗い位置決め情報を与え、最終のサーボバーストパターン26は、細かいヘッド位置決め情報を与えて、ヘッドが、読出のために追従されるデータトラックの読出素子中心線で正確に制御され、ユーザデータの書込のために追従されるデータトラックの書込素子中心線を追従するために制御されることを可能にする。

【0053】場合によっては、リーダ/ライト幅許容差を緩やかにしかつ/または上記に述べた1) 2) および3) の限界を超えて書込対読出のオフセットを増大させることが望ましいであろう。そのような場合には、ディスクドライブ100が、最終のバーストパターンをセルフライトするより前に、第2の中間サーボバーストパターンをセルフライトすることが实际的である。したがって、サーボライタ32の支援によって与えられた元々の基準バーストパターン24および第2の中間パターンは、セルフスキャンユニット52でドライブ100によってセルフライトされ、最終製品バーストパターンを生成するために使用される。最終のパターンは、図10による、6個バーストのトリミングされていないパターンであってもよく、4個バーストのトリミングされたバーストであってもよく、または、ドライブ専用のリーダ/ライト幅および書込対読出のオフセットに鑑みて回転アクチュエータ16のストロークにわたって堅固かつ信頼性のある線形化可能PESを与える他の好適なバーストパターンであってもよい。

【0054】図2に示すとおり、組立てられたディスクドライブ100は、電子部品およびドライブコントローラ回路基板50内に読出チャンネル51を含む。いくつかの場合には、読出チャンネル51は、デジタル情報フィールド23の読出およびデコードに続く、有限数のサーボバーストの相対振幅の読出および捕獲に制限されてもよい。たとえば、いくつかの読出チャンネルチップアーキテクチャでは、読出/書込チャンネルチップは、デジタル情報フィールド23を読出ししかつ利用して、サーボバーストフィールド22、24および/または26を書込んでから、単一のサーボセクタ間隔内のバーストを復調することができないこともある。この制限のために、変形されたセルフサーボライト方式が、所望の最終のセルフライトされたサーボパターン25を達成するためにとられ、さらに、図1のサーボライタステーション32などの工場のサーボライタを最小限使用してもよい。

【0055】図11を参照すると、現在のところ好ましいサーボライトシーケンスは、デジタル情報フィールド

23および基準サーボバーストフィールド22を第1の基準サーボセクタパターン25Aとして書込むことを支援するためにサーボライタステーション32をまず必要とし、第2のデジタル情報フィールド23Aおよび基準サーボバーストフィールド22Aを第2の基準サーボセクタパターン25Bとして書込むことを支援する。図7に示すとおり基準トラック40が、サーボライタステーション32の制御下で書込まれてもよい。図12に示すとおり、ドライブ100が組立てられセルフスキャンステーション52に転送された後、ドライブは、サーボフィールド25A内の第1の基準パターン22のすぐ後に続く場所に基準バーストパターン22に対してたとえば16.67%のトラックピッチでバーストd、eおよびfからなる中間バーストパターン24をセルフライトする。次に、図13に示すとおり、バーストD、EおよびFからなる最終製品のバーストパターンフィールド26が、第2のサーボセクタ25B内に第2の基準バーストパターン22Aのすぐ後にドライブ100によってセルフライトされる。次に、もともとのサーボパターン25Aは、適切なディスクドライブ動作のためには必要でなく、したがってはディスク記憶表面のユーザデータ記憶セクタ内に究極的には存在するので、DC消去またはユーザデータで上書可能となる。

【0056】1インチ当り16,000トラックのトラック密度、90Hzのスピンドル回転速度、0.9645インチの全半径方向アクチュエータストローク、各データトラック当り1.5サーボトラック、ディスクのセルフサーボライト中1サーボトラック当り14ディスク回転および1時間当り3600秒を有する例示の3.5インチディスクドライブのあるデータ表面をセルフサーボライトするために必要とされるおおよその推定時間(T_H)は、 $T_H = (16000 * 0.9645 * 1.5 * 14 * 1 / 90) / 3600 \sim 1$ 時間(1ヘッド当り)である。

【0057】各サーボトラックについての14回転中に、おおよそ1回転が、次のトラックをシークしかつこれに定まるために必要とされ、1回転が、各中間バーストd、eまたはfを書込むために必要とされ、1回転が、最終製品のバーストD、EまたはFを書込むために位置をシークし定まるために必要とされ、8回転が、より高いRRO調波を拒絶するためにRRO情報を収集するために必要とされ、2回転が、追従されるトラック軌跡に沿って存在する位置的誤りRROを相殺するために、記録され後にデジタル化されたPESと組合されるバースト補正值(BCV)を計算するために必要とされる。BCVは最初、たとえば、回路基板50上のドライブのパッファメモリ55内に記憶される。次に、最後の1回転が、特定のセクタ場所についてメモリ内に記憶されたBCVおよびPESを用いてフィールド26内の最終製品のバーストD、EまたはFを書込むために必要と

される。RROが、BCVを用いて中間および最終バーストパターンを書込むことによって向上されると、各サーボトラックについて14より多くの回転が必要とされてもよい。BCVは、サーボセクタのBCVフィールド内に記録され、ドライブの製造および顧客への搬送の後に、製品のサーボシステムによって使用されてもよい。

【0058】BCVは、ディスク12の複数の回転にわたって決定可能であり、ヘッド読出素子19は、同じ半径方向アクチュエータ位置(トラック軌跡)を追従する。バースト補正值を計算するための方法の現在のところ好ましい一例は、「サーボパターン誤りのインドライブ補正」(“In Drive Correction of Servo Pattern Errors”)と題するシェパード(Shepherd)らに付与され同一人に譲渡された米国特許番号第5,793,559号に記載され、その開示はここに引用により援用される。BCVがドライブ電子部品50によって計算された後、最終バーストD、EおよびFが各最終サーボセクタに書込まれる際に、値は、ヘッドアーム16およびヘッド15の位置を調整するために与えられる。このようにして、最終のセルフライトされたバーストパターン26は、サーボライタ32を用いる1回の通過中に書込まれた等価のパターンより少しも不良ではないRROを有し得る。セルフサーボライト中にドライブサーボループが、ディスク変動および/またはスピンドルNRROを補償するのであれば、最終サーボバーストパターンは、サーボライタで生成されたサーボバーストパターンよりも実際は少ないRROを有し得る。好ましいセルフサーボライト方法は、ドライブが必要とする中間バーストd、eおよびfのすべてをまず書込み、次に、各最終バーストD、EまたはFを書込む直前に、RROを集め適切なBCVデータを処理することによって、戻って最終バーストを書込むことを必要とする。

【0059】製品サーボバーストをセルフサーボライトする際に、サーボバーストによって決定されるトラック中心線とデジタルサーボ情報フィールドのトラック中心線との設計相関関係を維持することが非常に重要である。したがって、低調波RROは、ディスクドライブサーボループの適合可能なランアウト補正システムが後に続き、高調波RROは、最終バーストパターンを書込む際にBCVを用いることによって補正される。トラック幅に比べて小さいどの書込ランアウトについても、そのようなランアウトは好ましくは、より円形のトラック軌跡を規定するためにより滑らかなバーストが書込まれるように無視される。

【0060】セルフスキャンユニット32でセルフサーボライトする時間は、サーボライタ/クリーンルーム時間よりもそれほど貴重ではないので、初期基準バーストパターン22を書込む際のサーボライタ32でのディスク回転を高速化し、中間バーストパターン24および最終バーストパターン26の書込の際のセルフスキャンで

のディスク回転を遅くすることが実務的となる。この方策はまた、最終バーストパターン26における書込反復可能ランアウトの量を低減することを支援する。

【0061】デュアルステージアクチュエータの使用は、この発明の実現における実務的な向上をもたらす。ヘッドポジション16が公称シリンドリク中心に置かれると、特定のヘッドと関連付けられるマイクロアクチュエータ18が、所望のトラック軌跡を追従するよう「向けられ」てもよい。

【0062】ドライブ読出チャネルチップ51のいかなる限定からも独立して、ダブルサーボ基準パターンをディスク12上に書込んで、セルフスキャンセルフサーボライト動作中のダブルサンプルレート・サーボセクタサンプリング構成を可能にすることが望ましいであろう。基準サーボバーストのダブルサンプリングは、ドライブサーボループが、セルフサーボライトプロセス中によりうまくNRROを追従することを可能にし、その結果として、セルフサーボライトされたバーストD、EおよびFにおいてRROはより少なくなる。ダブルサンプルサーボレートは、ディスクドライブ制御電子部品が、必要とされる計算を実行する際にさらなるディスク回転レイテンシを不当に招くことなしに、必要なRRO計算およびBCV計算をするために十分な計算速度およびデータ処理能力を有することを想定する。セルフサーボライト中にヘッドディスクアセンブリ10を制御するために、製品の電子基板50に代わってこの場合には、専用高速コンピュータを用いてもよい。

【0063】スタグガーサーボライトおよびバンクサーボライト技術が公知であるが、ディスクスタックに沿ってヘッドからヘッドへ（表面から表面へと）漸進するスタグガーセルフサーボライトプロセスを採用することが、現在のところ好ましい。スタグガーセルフサーボライトとは、ドライブの記憶表面のサーボパターンが、ディスクの1回の回転中に漸進的に書込まれる（円周的にスタグガーされる）ことを意味する。この方策は、サーボライタステーション32での時間を最小にするために時々採用されるが、この発明の原理に従って用いられると、この方策によって、バーストによって規定されるトラックの中心とコヒーレントなデジタル情報フィールド23内のトラック数によって示されるトラックの中心との間にかんがりのオフセットがもたられる可能性がある。このオフセットは、公称トラックの近傍のさまざまなオフトラック位置を追従し、かつトラック数値が各オフセットごとにいかに異なるかを注目することによって、較正可能である。このオフセットがサーボトラックピッチの小部分内に（データトラックピッチの3分の2）あるように較正することが必要である。較正があまりにもかけ離れると、これは、ドライブ100が間違ったトラック位置にデータを書込みしたがってユーザデータを失ってしまうように、デジタルトラック数とバースト決定されたトラック中心線との間の不一致がもたら

れる可能性がある。

【0064】バンクサーボライトは、ディスクの1回の回転中に並列にサーボ情報ですべてのデータ記憶表面を書込むことを必要とし、バンク書込は、スタグガーサーボライトで注目されるオフセットの問題に加えて別の問題を有する。ヘッド間での接線スキューは、ディスクドライブがサーボライタステーション32からセルフスキャンステーション52へと移されるとき、大きく変わる可能性がある。実際の測定値は、5個の3.5インチディスクの、5400RPMドライブの上部ヘッドから下部ヘッドまでの接線スキューは、2マイクロ秒ほどの長さがかかり得ることを示している。そのようなスキューは、デジタル情報フィールド23に対してバーストを位置決めするためにフォーマットされたスペースを残すことによって受入れられなければならないであろう。必要な許容差または「スロップ」時間の控えめな見積りは、2分1マイクロ秒であろう。デジタルフィールド23に対するバーストタイミングスキュー（レイテンシ）は、ヘッド当り、ゾーン当りをベースとして較正されなければならないであろう、そのため、ドライブのサーボ制御ループは、サーボバーストを適切に復調し、PESを生成することが可能である。しかしながら、デュアルステージアクチュエータが各個々のヘッド位置のサーボ制御について利用可能であれば、かつ、サーボパターンオフセットがディスク表面間で採用されるかまたは複数の読出／書込チャネルが同時に存在するかのいずれかであれば、マイクロアクチュエータ18に、ディスクスタックの特定のシリンドリク場所で、サーボライトまたはセルフサーボライトされた各記憶表面でのDCオフセットおよび学習されたNRROの効果を相殺させることによって、同時にかつ高い精度で複数の記憶表面をサーボライトすることが実務的であろう。

【0065】単一のヘッド／表面セルフサーボライトに従うことの利益の1つは、バースト中心とトラック数中心との間のオフセットが十分に小さいので、前に説明したとおり、サーボライタ32の監視下で書込まれる第1の3個の基準バーストA、B、Cの最終製品サーボパターン内での使用と、3個の最終バーストパターンD、EおよびFのみを書込むためにセルフサーボライトプロセスの使用とを可能とすることである。しかしながら上述したとおり、バーストトラック中心とデジタルトラック数中心との間のオフセットが大きすぎれば（適切に較正されなければ）、トラック数識別誤りおよびデータの損失が起こる可能性がある。

【0066】図14のフローチャートは、この発明の原理に従うディスクドライブ製造方法100を要約したものである。HDA10を含む構成要素および部品は、ステップ102で受取られ点検され、次にステップ104で、クリーンルームまたはクリーンな環境30内でHD

A10に組立てられ、テストされる。次に、テストされたHDA10は、サーボライタステーション32に移されるがなおクリーンルーム30内にあり、ステップ106で、初期基準サーボパターンが、サーボライタ32の直接の制御下で書込素子17によって少なくとも1つのディスク表面上に書込まれる。次に、HDA10は完全に被覆され、封止され、サーボライタステーション32およびクリーンルーム30から除去される。

【0067】ステップ110で、組立てられたドライブプリント回路基板が、受取られ電氣的に検査される。基板は次に、ステップ112で、HDAと併合され、ディスクドライブアセンブリプロセスを完了し、次に、セルフスキャンラック場所に移される。ステップ114で、ドライブがセルフスキャンユニット52に接続された後、セルフサーボライトファームウェアが、ドライブのバッファ55にダウンロードされる。次に、ステップ116で、半径方向および接線書込素子対読出素子のオフセット、各ヘッド15ごとのPES線形化およびアクチュエータストロークにわたるトルク定数(k_t/T)を含む(しかしこれに必ずしも限られるわけではない)多数の重要な校正を行なう。ステップ118で、たとえばバーストd、eおよびfなどの中間サーボバーストの組のパターンが、各記憶表面にドライブによってセルフライトされ、ステップ120で、たとえばバーストD、EおよびFなどのバーストパターンの最終の組が、各記憶表面にセルフライトされる。元々の/中間バーストパターンは次に、セルフスキャン中に、ステップ122でテストパターンで上書されるかまたはDC消去されることが可能である。最後に、ドライブは、ステップ124で、顧客の特定の要求のために構成され、ステップ126で、梱包され顧客に発送される。

【0068】記載された特定の實現化例は、クレームを例示するものとして意図され、その範囲を限定するものではないことが理解されるべきである。いかなるそのような實際の實現化例の開発においても、システム関連およびビジネス関連の制約に応じるように開発者の特定の目的を達成するために、多数の實現化例に特定の決定がなされなければならない、これらの目的は、實現化例によって異なるであろうことがもちろん認められるであろう。その上、そのような開発努力は、複雑かつ時間がかかる可能性があり、それにもかかわらず、この開示の利益を有する当業者にとっては技術上の通常の業務であろうことが認められる。

【0069】この発明は、現在のところ好ましい実施例について記載されたが、この発明は、たとえば他のディスクドライブサーボライト方法およびパターンと関連付けて利用可能であることが当業者には明らかであるはずである。したがって、現在の開示が限定するものであると解釈されるべきでないことが理解される。さまざまな代替および変形が、上記の開示を読むと、当業者には疑

いもなく明らかとなるであろう。したがって、前掲のクレームは、この発明の真の精神および範囲にあるようなすべての代替および変形を含むものとして解釈されるべきであることが意図される。

【図面の簡単な説明】

【図1】 この発明の原理に従う第1の基準バーストパターンをサーボライトするためにクリーンルーム内のサーボライタステーションに位置するディスクドライブヘッドディスクアセンブリの概略的な平面図である。

10 【図2】 図1に同様の図であって、ただし、ヘッドディスクアセンブリが封止されドライブ電子回路基板がこれに設けられてディスクドライブアセンブリを完成し、さらにサーボバースト製品パターンをセルフライトするためにパーンインユニットに移されている、この発明の原理にさらに従う図である。

20 【図3】 Aは、2つの半径方向にオフセットされ半径方向にトリミングされたバーストの隣に並置されるMR読出素子の概略図であり、Bは、Aのトリミングされたバーストパターンについてのバースト確立されたトラック中心線からのMR読出素子の半径方向変位の関数としてのバースト振幅差のグラフである。

【図4】 Aは、2つのトリミングされていない半径方向にオフセットされたバーストの隣に並置されるMR読出素子の概略図であり、Bは、Aのトリミングされていないバーストパターンについての、バースト確立されたトラック中心線からのMR読出素子の半径方向変位の関数としてのバースト振幅差のグラフである。

30 【図5】 図1のサーボライタを用いて記録された1つ以上の基準トラックを各々含む6つの基準トラック領域によって張られた5つのデータゾーンに分割されたディスク表面の大きく拡大された平面概略図である。

【図6】 図1のサーボライタステーションで書込まれた、2データトラック当り3回通過の(1トラック当り1.5回通過)トリミングされていない基準サーボバーストパターンの大きく拡大された平面概略図である。

【図7】 図1のサーボライタステーションで図5の基準トラック領域内に書込まれたトリミングされていない基準サーボバーストパターンの大きく拡大された平面概略図である。

40 【図8】 図6の2データトラック当り3回通過のトリミングされていない基準サーボバーストパターンであって、2つのバースト間のゼロ点が、ライタ対リーダのオフセットが0である場合にサーボ基準場所を与え、これによって、この発明のさらなる原理および局面に従ってライタ幅またはリーダ幅の決定なしに3分の1ピッチで中間および最終サーボバーストパターンの直接書込を可能とする、トリミングされていない基準サーボバーストパターンの大きく拡大された平面概略図である。

50 【図9】 図6の基準トラックサーボバーストパターンと、セルフスキャン中にディスクドライブによってセル

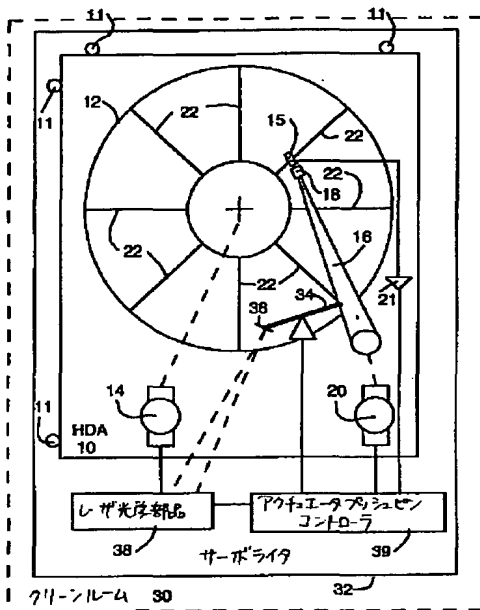
33

フライトされる中間のトリミングされていないサーボバーストのパターンとの平面図である。

【図10】 (最終的にはユーザデータパターンで上書きされる中間バーストとともに) セルフスキャン中にディスクドライブによってセルフフライトされる最終のトリミングされていないバーストを伴う図9のパターンの平面図である。

【図11】 図1のサーボライタステーションの支援によって書込まれた2つの、1データトラック当たり3回通過のトリミングされていないサーボバーストパターンで
10 あって、そのパターン的一方は、第1のサーボバーストパターンに加えて製品デジタルデータであり、パターン *

【図1】



34

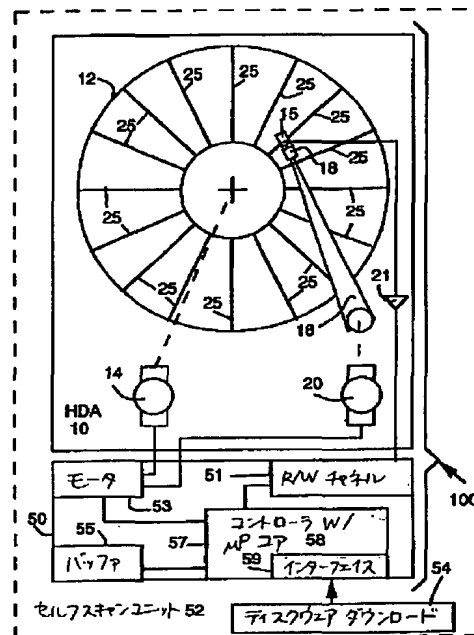
* の他方は、基準パターンである、サーボバーストパターンの代替の図である。

【図12】 図11の基準トラックサーボバーストパターンと、セルフスキャン中にディスクドライブによってセルフフライトされる中間のトリミングされていないサーボバーストのパターンとの図である。

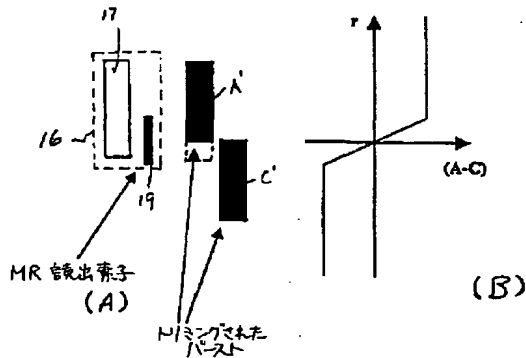
【図13】 図12の基準および中間サーボバーストパターンと、セルフスキャン中にディスクドライブによってセルフフライトされる最終のトリミングされていないサーボバーストパターンとの図である。

【図14】 この発明の原理に従うディスクドライブ製造プロセスの高レベルの流れ図である。

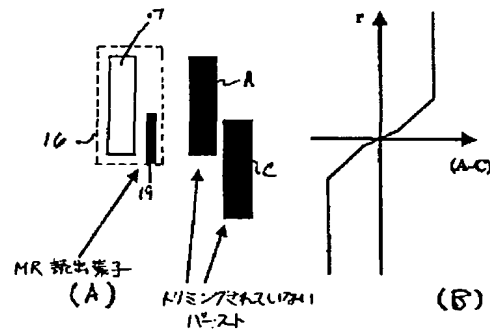
【図2】



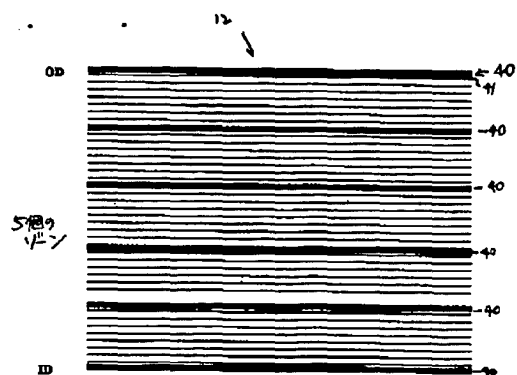
【図3】



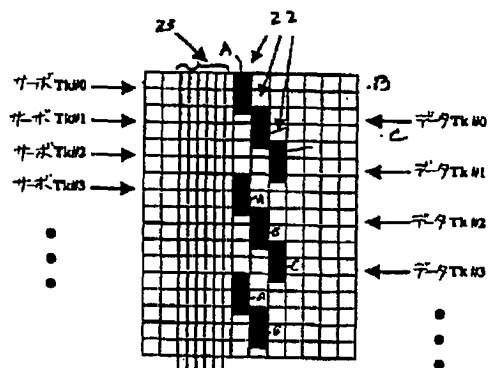
【図4】



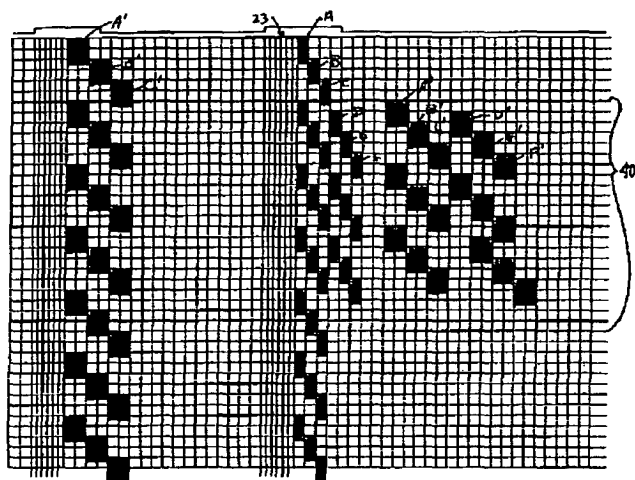
【図 5】



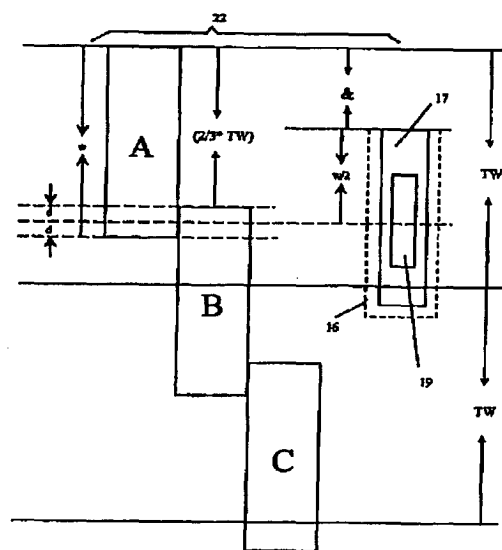
【図 6】



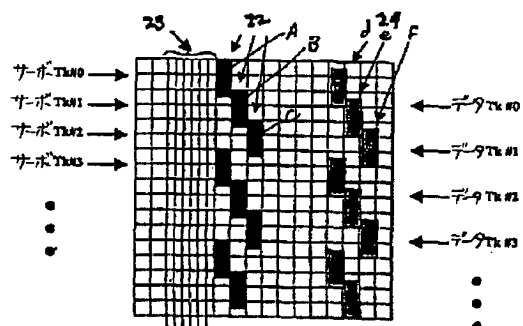
【圖 7】



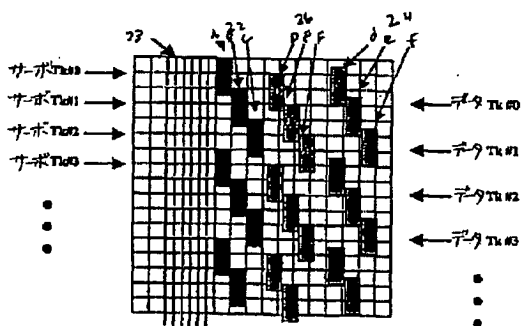
【图 8】



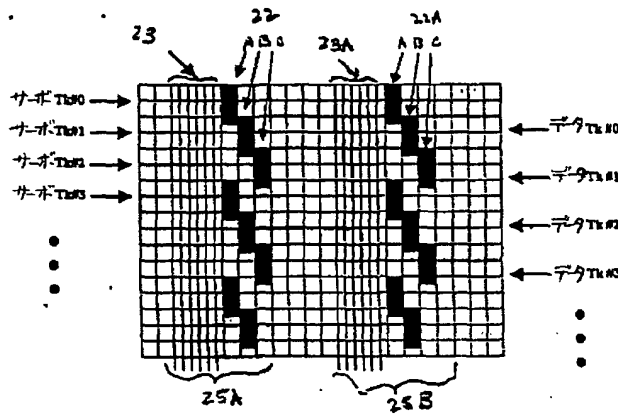
【図 9】



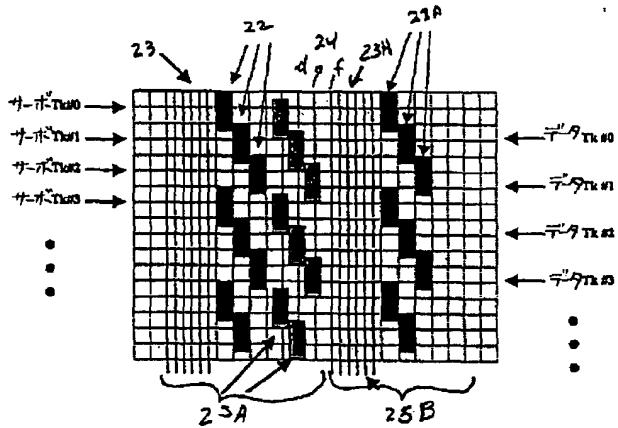
【图 10】



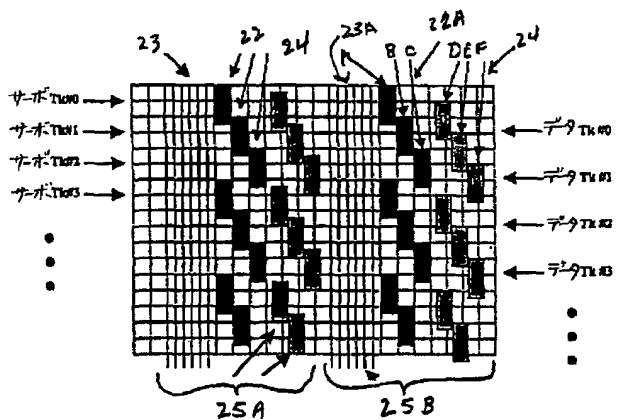
【図11】



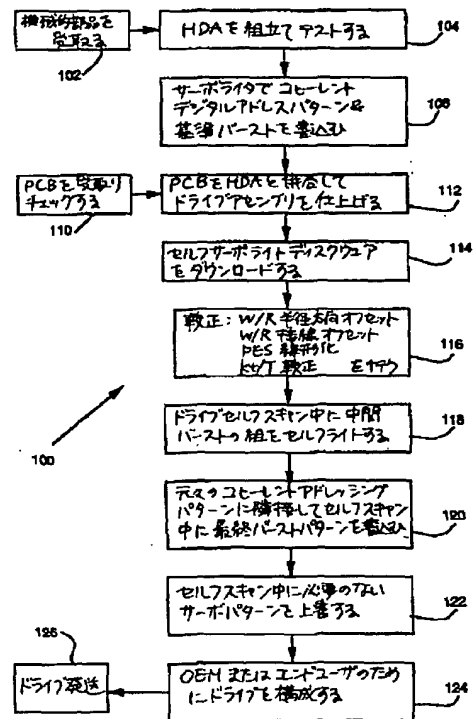
【図12】



【図13】



【図14】



フロントページの続き

(72)発明者 ジョン・リン
アメリカ合衆国、95014 カリフォルニア
州、クペルティーノ、克蘭ベリー・サー
クル、7950

(72)発明者 デイビッド・ビィ・ジェップソン
アメリカ合衆国、カリフォルニア州、リバ
ームーア、スタンフォード・ウェイ、4275

(72)発明者 沖 憲二
高知県宿毛市港南台 1 - 1 - 10

【外国語明細書】

1. Title of Invention**Magnetic Hard Disk Drive and Method for Servowriting Track Locations****2. Claims**

1. A method for servowriting track locations of a storage surface of a magnetic hard disk of a head-disk assembly, comprising the steps of:
servo-writing a first servo burst pattern by using a servowriter coupled to the head-disk assembly, and
self-writing a final servo burst pattern by using the first burst pattern without using the servowriter.

2. The method set forth in claim 1 comprising the further step of self-writing at some track locations of the storage surface a second servo burst pattern having circumferential burst edges radially offset relative to burst edges of the first burst pattern by reading the first burst pattern with a head of the head-disk assembly without using the servowriter, and self-writing at said some track locations a final servo burst pattern by using the first burst pattern and the second servo burst pattern without using the servowriter.

3. The method set forth in claim 2 comprising the further step of self-writing at said some track locations of the storage surface a third servo burst pattern having circumferential burst edges located radially intermediate circumferential edges of the first servo burst pattern and the second servo burst pattern, and wherein the step of self-writing at said some locations the final burst pattern is carried out by using the first burst pattern, the second burst pattern and the third burst pattern.

4. The method set forth in claim 3 comprising the further step of self-writing at said some track locations of the storage surface a fourth servo burst pattern having circumferential burst edges located radially intermediate circumferential edges of the first servo burst pattern and the third servo burst pattern, and wherein the step of self-writing at said some locations the final burst pattern is carried out by using the first burst pattern, the second burst pattern, the third burst pattern and the fourth burst pattern.

5. The method set forth in claim 1 wherein the step of servowriting the first servo burst pattern is carried out at a servowriter station located within a clean

room environment, and wherein the steps of self-writing the final servo burst pattern is carried out at a location outside of the clean room environment.

6. The method set forth in claim 5 comprising a further step of attaching and connecting a drive electronics circuit board to the head-disk assembly following the servowriting step, and using drive electronics of the circuit board to carry out the self-writing step during drive self-scan at a self-scan station outside of the clean room environment.

7. The method set forth in claim 6 comprising a further step of downloading self-servowriting control routines to the drive electronics prior to the self-servowriting step.

8. The method set forth in claim 1 comprising further steps of servo-writing at least one reference track by using the servowriter and self-reading the at least one reference track to determine characteristics of the head-disk assembly.

9. The method set forth in claim 8 wherein the step of servowriting at least one reference track comprises servo-writing a plurality of reference tracks across a radial extent of a storage disk of the head-disk assembly and wherein the step of self-reading the at least one reference track comprises the step of self-reading the plurality of reference tracks.

10. The method set forth in claim 8 wherein the head-disk assembly includes a rotary actuator head positioner for positioning a dual element read/write head having a read element with a width less than a write element, such that the read element manifests a positional offset relative to the write element as a function of angular position of the rotary actuator head positioner, and wherein the step of determining characteristics includes the step of determining reader to writer offset as a function of angular position.

11. The method set forth in claim 1 wherein a final servo sector burst pattern of the head-disk assembly includes the first burst pattern and the final burst pattern.

12. The method set forth in claim 11 wherein the final servo sector burst pattern of the head-disk assembly includes an untrimmed six burst pattern comprising untrimmed bursts A, B, C of the first pattern and untrimmed bursts D, E, and F, each burst being radially offset from every other burst within the burst pattern.

13. The method set forth in claim 12 wherein each data track is nominally centered on the storage surface in accordance with the relation: $\{(C-A) - (D-E)\} = 0$.

14. The method set forth in claim 13 comprising a further step of attaching and connecting a drive electronics circuit board to the head-disk assembly following the servowriting step, and using drive electronics of the circuit board to carry out the self-writing step during drive self-scan at a self-scan station outside of the clean room environment, and wherein the drive electronics calculates the relation set forth in claim 11 in carrying track following operations during drive operations following self-servowriting.

15. The method set forth in claim 1 wherein a head of the drive includes a write element and a read element, wherein the write element has a writing width approximately two-thirds of a track width and wherein the final servo sector burst pattern of the head-disk assembly includes an untrimmed six burst pattern comprising untrimmed bursts A, B, C, D, E, and F, each burst being radially offset from every other burst within the burst pattern by one-third track pitch.

16. The method set forth in claim 15 wherein untrimmed bursts A, B and C are recorded at the servo-writing step, and wherein the bursts D, E and F are recorded at the self-writing step.

17. The method set forth in claim 16 comprising the further step of determining write element to read element offset and wherein the drive self-writes the final servo burst pattern at one-third track pitch intervals after determination of

write-element-to-read-element offset by following A-B or B-C burst centerlines without determining write element width or read element width.

18. The method set forth in claim 17 wherein the write element has an electrical width lying in a range between 66% and 120% of nominal track width, and wherein the read element has an electrical width lying in a range between 35% and 75% of the nominal track width.

19. The method set forth in claim 1 wherein the step of servo-writing a first servo burst pattern by using a servowriter coupled to the head-disk assembly is carried out by progressively writing servo tracks having a servo track pitch of one and one half times a data track pitch of data tracks defined on the storage surface of the disk such that there are two servo track writing passes for each data track.

20. The method set forth in claim 1 wherein the step of servo-writing a first servo burst pattern by using a servowriter further comprises writing digital servo data to the surface.

21. The method set forth in claim 20 wherein the step of writing digital servo data to the surface is carried out directly ahead of the step of writing the first servo burst pattern.

22. The method set forth in claim 1 wherein the step of self-writing a final servo burst pattern by using the first burst pattern without using the servowriter comprises the step of determining repeatable runout errors over multiple revolutions of the disk at a particular data track location and calculating and applying burst correction values to minimize determined repeatable runout errors while self-writing the final servo burst pattern.

23. The method set forth in claim 22 comprising the steps of attaching and connecting a drive electronics circuit board to the head-disk assembly following the servowriting step, and using drive electronics of the circuit board to carry out the self-writing step during drive self-scan at a self-scan station outside of the

clean room environment, including the step of calculating and applying burst correction values while self-writing the final servo burst pattern.

24. The method set forth in claim 22 comprising the step of connecting a digital computer to the head-disk assembly following the servowriting step, and using the digital computer to carry out the self-writing step including the step of calculating and applying burst correction values while self-writing the final servo burst pattern.

25. The method set forth in claim 1 wherein the step of writing digital servo data and the first servo burst pattern to the surface includes writing first and second servo sets of digital servo data and first servo burst patterns to the surface, and wherein the final burst pattern is self-written within an other one of the first and second servo sets, and comprising the further step of overwriting said one of the servo sets.

26. A magnetic hard disk drive including at least one data storage disk rotated by a spindle motor, a head transducer comprising an inductive write element and a magneto-resistive read element and positioned at radial track locations defined on a storage surface of the disk by a head positioner, the disk drive including write/read channel connected to the head transducer, a spindle driver for driving the spindle motor, a positioner driver for driving the head positioner, an interface for connecting the drive to an external computing environment and including a cache buffer, and a drive controller for controlling at least the head positioner to position the head transducer at selected data tracks, the disk drive having a reference servo patterns recorded onto at least a part of the storage surface by a servo writer as a part of a manufacturing process, the reference servo patterns being incomplete with respect to a final product pattern, the disk drive having self-servo-writing software executed by the drive for self-writing embedded servo final product patterns across the storage surface in response to the reference servo patterns.

27. The magnetic hard disk drive set forth in claim 26 wherein the reference servo patterns are recorded into the storage surface by the write element of the head transducer under direct control of the servo writer.

28. The magnetic hard disk drive set forth in claim 26 wherein the reference servo patterns include digital track information fields which are substantially phase coherent from track to track and which include digital track number information.

29. The magnetic hard disk drive set forth in claim 26 wherein the reference servo patterns include repeating patterns of circumferentially sequential, radially offset reference servo bursts.

30. The magnetic hard disk drive set forth in claim 29 wherein the write element has a magnetic writing width which is wider than a magnetic reading width of the read element and wherein the reference servo bursts provide centering information relative to a data track for some, but not all radial positions within a single track pitch.

31. The magnetic hard disk drive set forth in claim 30 wherein the magnetic writing width lies in a range of 66% and 120% of nominal track width, and wherein the magnetic reading width lies in a range between 35% and 75% of the nominal track width.

32. The magnetic hard disk drive set forth in claim 31 wherein the head positioner comprises a rotary actuator and wherein the disk drive self-servo-writing software causes the disk drive to self-write intermediate servo bursts by reference to the reference servo bursts, and self-write final a product servo burst pattern by reference to the intermediate servo bursts.

33. The magnetic hard disk drive set forth in claim 32 wherein the disk drive self-writes intermediate servo bursts in user data locations, and wherein the self-servo-writing software causes the disk drive to overwrite the intermediate

servo bursts with user data during subsequent user data storage and retrieval operations of the disk drive.

34. The magnetic hard disk drive set forth in claim 31 wherein the reference servo bursts are included within a final product servo burst pattern self-written by the disk drive.

35. The magnetic hard disk drive set forth in claim 31 wherein a final product servo burst pattern self-written by the disk drive comprises for each pair of adjacent data tracks an untrimmed six servo burst pattern of bursts A, B, C, D, E, and F.

36. The magnetic hard disk drive set forth in claim 35 wherein the disk drive controller causes the head positioner to center the head transducer on a data track in accordance with the relation: $\{(C-A) - (D-E)\} = 0$.

37. The magnetic hard disk drive set forth in claim 26 wherein the disk drive comprises a dual-stage actuator having a micro-actuator for independently positioning each head transducer, and wherein the disk drive controller separately controls the head positioner and each micro-actuator.

38. A disk drive comprising a magnetic data storage disk having a storage surface defining an embedded servo pattern, a head transducer comprising a magnetic write element having a magnetic writing width in a range between 66% and 120% of nominal track width, and a magneto-resistive read element having a magnetic reading width in a range between 35% and 75% of the nominal track width, a head positioner for positioning the head transducer relative to concentric data storage tracks further defined on the storage surface, the embedded servo pattern comprising for each pair of adjacent data tracks an untrimmed six servo burst pattern of bursts A, B, C, D, E and F.

39. The disk drive set forth in claim 38 wherein the untrimmed servo bursts A, B and C are written to the surface by the magnetic write element while under direct control of a servo-writer within the disk drive manufacturing process, and

wherein the untrimmed servo bursts D, E and F are self-written by the disk drive during a drive self-scanning operation following the servo-writer step.

40. The disk drive set forth in claim 39 wherein the disk drive comprises a rotary head positioner and self-writes an intermediate set of servo bursts d, e, and f, by reference to bursts A, B, and C, before self-writing the untrimmed servo bursts D, E, and F in order to compensate for write element/read element offset angle attributable to radial position of the head transducer relative to the data storage surface.

41. The disk drive set forth in claim 40 wherein the intermediate set of servo bursts d, e, and f are self-written by the disk drive at radial offsets of approximately 16.7% of the bursts A, B, and C, respectively, and wherein the servo bursts D, E, and F are self-written by the disk drive at radial offsets of approximately 16.7% of the bursts d, e, and f, respectively.

42. The disk drive set forth in claim 38 wherein the embedded servo pattern also comprises digital track information fields adjacently preceding the servo bursts and which digital track information fields are substantially phase coherent from track to track and include digital track number information read by the read element.

43. The disk drive set forth in claim 38 wherein the disk drive comprises a dual-stage actuator having a micro-actuator for independently positioning each head transducer, and a disk drive controller for separately controlling the head positioner and each micro-actuator.

3. Detailed Description of Invention

This invention relates generally to head positioning in magnetic hard disk drives. More specifically, the present invention relates to a method for writing head position reference servo patterns on a magnetic data storage disk by employing a servowriter to record a coarse position reference burst pattern, and then by employing the disk drive servo to self-write a final fine position burst reference pattern based on the coarse position burst reference pattern.

Magnetic hard disk drives conventionally employ rotary voice coil head positioners for rapidly moving a data transducer head between concentric data tracks during track seeking operations and for maintaining the head over a selected data track during user data writing or reading operations. The data transducer head is maintained in very close proximity to a rotating magnetic data storage surface by flying on an air bearing at approximately one microinch, or less, above the surface. In this way, lineal data storage densities can be made very high. As lineal recording densities have begun to approach practical limits, another more recent trend for increasing storage capacity has been to make effective head magnetic widths narrower and narrower, in order to reduce track width and thereby increase the number of concentric data tracks that may be defined on a disk storage surface of standard manufacturing size, such as 3.5 inches in diameter.

Dual head structures have been adopted in order to recover discernable flux transition signals recorded on the disk. An inductive write element is used to write flux transitions onto the disk, while a separate read element of magneto-resistive or giant magneto-resistive material is used to read the flux transitions from the disk. It is known to provide a relatively wide write element, and a

relatively narrow read element. In fact, narrower read elements are presently preferred because they permit a track to be read even though the head may not be precisely registered with, r maintained at, a track centerline by the head positioner. This relaxed tracking tolerance means that a less complex and expensive head position tracking system (servo) can be employed within the disk drive product. The use of separate write and read elements necessitates different tracking target positions for reading and writing, because of the presence of manufacturing tolerances. When a rotary head positioner is used, the write-to-read offset (the radial separation between the optimum tracking targets for writing and reading on a given track) clearly varies across the stroke of the rotary positioner as a function of the skew angle of the head support structure (air bearing slider body) relative to the recorded track. This offset variation at any particular position is known as the "write-to-read offset". One drawback of narrow read elements is that such elements make it difficult to obtain a good position error signal ("PES") at all positions across the radial width of a data track when used with a traditional burst pattern, for example the pattern described in commonly assigned U.S. Patent No. 5,170,299 to R. Moon, entitled: "Edge Servo for Disk Drive Head Positioner", the disclosure thereof being incorporated herein by reference. This drawback requires provision and use of a special servo burst pattern that provides a usable PES at virtually all radial head positions, relative to actual center, for each track across the actuator stroke.

The write and read elements of dual head structures can have certain positional offsets, particularly when a rotary voice coil actuator is used to position dual-element heads. With a rotary actuator the positional offsets between the write and read elements vary over the rotational stroke of the actuator and head transducer relative to the disk surface.

Because the data tracks are placed very close together (high track density of 1,000 to 20,000 tracks, or greater, per disk radial inch) a head position servo loop is typically provided as part of the disk drive electronics in order to control the head positioner. In order to provide head position information to the servo loop, each magnetic storage surface typically carries recorded servo information. This information is most frequently "embedded" within each data track as a

circumferential series of narrow servo sectors between user data sectors or segments, sometimes referred to as "wedges" or "spokes". The servo information typically comprises certain phase-coherent digital information used during track seeking and coarse positioning operations, and fine position information typically in the form of burst patterns used for head tracking during reading and writing operations from and to a particular track. Once written during a servowriting step within the disk drive manufacturing process, servo sectors are thereafter protected by disk drive controller logic from overwriting as being denominated "read-only" areas of the disk's storage surface. As the head passes over a servo sector location, coarse and fine position information is sampled by the head, and this sampled information is provided to, and used by, the disk drive's servo control loop for closed loop control of the head positioning apparatus during track seeking and track following operations.

In order to provide precisely written servo information, very precise servowriting instruments, typically employing laser-based interferometer technology, are employed within "clean rooms" of the drive manufacturing facility wherein atmospheric particulate contamination is closely controlled. Clean rooms are required because the disk drive is typically servo-written with its interior exposed to the ambient environment. The laser-interferometer servowriter precisely measures actuator position of the disk drive. Based upon this precisely measured position, a drive head positioner, such as a rotary voice coil actuator, is moved under servowriter control from track to track while each data head in turn writes the servo information to an associated data storage surface. Once the servo pattern is written, it can be tested by a read back procedure while the drive remains at the servowriter station in order to verify that the servo patterns have been effectively and accurately written. It is known to write servo bursts with three passes per track under servowriter control. However, with a high number of tracks on each disk surface, the servo burst writing process can become very time consuming and therefore very expensive.

Representative examples of disk drive servowriters and servowriting techniques are provided in U.S. Patent No. 5,748,398 to Seo, entitled: "Method for Writing Servo Signals onto a Magnetic Disk and Magnetic Disk Drive Equipped

with Magnetic Disk(s) Having Servo Pattern Recorded by the Method"; U.S. Patent No. 5,726,879 to Sato, entitled: "Control Apparatus, a Stage Apparatus and a Hard Disk Servowriter Apparatus Including a Robust Stabilizing Compensator"; U.S. Patent No. 5,627,698 to Malek, entitled: "Servo Information Recording Method and Apparatus for an Enclosed Data Storage System"; U.S. Patent No. 5,339,204 to James et al., entitled: "System and Method for Servowriting a Magnetic Disk Drive", the disclosures thereof being incorporated herein by reference. One characteristic which is common to servowriters is that they are very complex and expensive items of capital equipment within the disk drive manufacturing process. Servowriter and related clean room costs must be amortized as an incremental cost burden of each disk drive being produced and servowritten.

It has been proposed to write a servo pattern on a surface of a reference disk with a servowriter. Following installation of the reference disk onto a disk drive spindle, the reference servo patterns are used to write embedded servo patterns onto other storage surfaces within the disk drive. Such approach is described by H. Ono, in an article entitled: "Architecture and Performance of the ESPER-2 Hard-Disk Drive Servowriter", IBM J. Res. Develop., Vol. 37, No. 1, January 1993, pp. 3-11. One drawback of the approach described by Ono is that a center of revolution of the reference disk on the servowriter may not correspond to a center of revolution of the reference disk in the disk drive, and that non-repeatable runout errors in radial and tangential dimensions differ between the different disks in the disk drive. (Tangential tracking errors interfere with servo information phase coherency and impose limitations upon servo clocking speed for the phase coherent digital servo information fields).

Since a data storage disk surface may contain media defects or anomalies, it has been proposed to write multiple servo pattern sets and then select an error free set, while overwriting (erasing) the other sets. This approach is described in commonly assigned U.S. Patent No. 5,553,086 to Sompel, et al., entitled: "Multiple Servo Sector Sets Write With Self-Verification for Disk Drive", the disclosure thereof being incorporated herein by reference.

As already mentioned the embedded servo information typically comprises certain digital data followed by certain fine position bursts recorded at a fixed frequency used for following a particular data track. The digital data desirably remains phase-coherent from track to track so that it can be read during track seeking operations, and also read while the servo system is track-following between two tracks. The fine position bursts are circumferentially sequential and radially offset, so that as the head passes over fractional portions of burst sets, fractional burst amplitude samples are read. These amplitude samples are compared and used by the servo system to generate a PES to control head position during track following operations when reading and writing is carried out. Because of the write-to-read offset or offset between the read and write elements of a dual head structure at a particular track location, micro-jogging operations may be employed for proper head positioning. A disk drive having a head transducer comprising a relatively wide inductive write element and a relatively narrow magneto-resistive read element, and wherein the head transducer is positioned by micro-jogging a rotary voice coil actuator, is illustrated and described in commonly assigned U.S. Patent No. 5,587,850 to Ton-that, entitled: "Data Track Pattern Including Embedded Servo Sectors for Magneto-Resistive Read/Inductive Write Head Structure for a Disk Drive", the disclosure thereof being incorporated herein by reference.

Following servowriting and while remaining within the clean room environment, the disk drive head-disk- assembly ("HDA") is sealed to prevent external particulate contamination. After the HDA has been sealed and moved out of the clean room, an electronics circuit board is connected to the HDA to complete the physical assembly of the drive. At this stage, the fully assembled disk drive is sent to a burn-in rack or self-scan station where it is typically operated continuously over a period of time, and also typically over a range of temperatures, to assure reliability. Also, during self-scan, the drive conducts certain self-scan operations and discovers and develops certain facts and characteristics about itself, such as the reliability and characteristics of the heads and storage disks, and the locations of any media defects. These data are then typically recorded on reserved tracks of the disk drive and may be used later during normal disk drive operations in order to maintain and control drive

performance. Also, during self-scan, certain configuration and operational firmware and software may be transferred to reserved tracks of the disk(s) for later use by the embedded disk drive controller during normal drive data storage and retrieval operations.

As the number of data storage tracks per disk surface (track density) increases, servowriter accuracy and writing time proportionally increases. While it is theoretically possible to provide an unlimited number of expensive servowriters within a clean room drive manufacturing environment, in practice a limited number of servowriters only are available, and servowriting time can become a manufacturing bottleneck, particularly as newer disk drive designs have included storage surfaces having thousands of data tracks. Also, it would be desirable to utilize servowriters of a given writing accuracy over a number of product cycles, each cycle typically manifesting increased track density.

Burn-in or self-scan racks are far less expensive than servowriters, and adding self-scan rack capability to the manufacturing process raises the burdened costs of the drive far less than adding servowriting capacity.

One proposal to reduce the cost of servowriting disk drives has called for moving the servowriter out of the expensive clean room. This approach calls for localized ambient air purification and scrubbing as by injecting clean air into a clock head port of the disk drive in a positive pressure arrangement such that the injected air exits the drive at the servowriter push-pin port. While this is a cheaper approach than the clean room, it still requires an expensive servowriter apparatus, and the possibility of particulate contamination entering the disk drive interior is greater than from using the clean room environment.

Several self-servo-writing methods and algorithms have been proposed in an attempt to avoid the cost and inconvenience of the servowriter entirely. One such approach is described in commonly assigned U.S. Patent No. 5,668,679 to Swearingen et al, entitled: "System for Self-Servowriting a Disk Drive", the disclosure thereof being incorporated herein by reference. Other examples are found in U.S. Patent No. 5,448,429 to Cribbs et al. entitled: "Self-Servowriting

Disk Drive and Method"; U.S. Patent No. 5,541,784 to Cribbs et al. entitled: "Bootstrap Method for Writing Servo Tracks on a Disk Drive"; U.S. Patent No. 5,757,574 to Chainer et al., entitled: "Methods and Systems for Self-Serv writing Including Maintaining a Reference Level Within a Usable Dynamic Range"; U.S. Patent No. 5,793,554 to Chainer et al., entitled: "Self-Serv writing System with Dynamic Error Propagation Reduction"; U.S. Patent No. 5,570,247 to Brown et al., entitled: "Self Servowriting File"; and U.S. Patent No. 4,414,589 to Oliver et al., entitled: "Embedded Servo Track Following System and Method for Writing Servo Tracks", the disclosures thereof being incorporated herein by reference.

While complete self-servowriting is a highly desirable goal, it is very difficult to realize in practice, given manufacturing tolerances in head widths, gains, alignments, storage media characteristics and quality, etc. Simply put, self-servowriting procedures so far have proven problematic in disk drive mass production in providing digital servo information that remains phase coherent from track to track across the data storage surface, and in establishing sufficiently accurate positioning for servo bursts needed to provide linear PES values for current data track densities, which are quickly approaching 20,000 tracks per inch. Such high track densities not only require more precisely written servo reference patterns, but also high bandwidth servo control loops. High bandwidth servo loops may be implemented by use of dual-stage actuators, for example. One dual-stage actuator employing a piezoelectric device within a magnetic head arm is described in U.S. Patent No. 5,189,578 to Mori et al., entitled: "Disk System with Sub-Actuators for Fine Head Displacement", the disclosure thereof being incorporated herein by reference.

Therefore, a hitherto unsolved need has remained for a servowriting procedure which minimizes actual servowriter time while enabling the disk drive to self-servo-write embedded servo burst patterns supporting very high data track densities during drive burn in without need for writing coherent patterns outside of the servowriter environment.

One object of the present invention is to reduce the amount of time that a disk drive spends at a servowriter station during disk drive manufacturing in a manner overcoming limitations and drawbacks of the prior art.

Another object of the present invention is to improve the quality of product servo burst patterns by removing certain unwanted pattern artifacts, such as those attributable to disk vibration, during a self-servo-writing process following reference pattern writing within a servowriter environment.

A further object of the present invention is to provide a method for self-servo-writing of magnetic hard disk drives based on reference servo patterns written with the aid of a servowriter in a manner overcoming limitations and drawbacks of the prior art.

Yet another object of the present invention is to employ a servowriter within a disk drive manufacturing process to record phase-coherent digital servo information and a reference burst pattern, and then use the completed disk drive to self-write more detailed and comprehensive servo burst patterns derived from the reference burst pattern during extended self-scan operations.

As a related object of the present invention, a servowriter writes an initial untrimmed three-burst-per-two-track burst pattern, and the disk drive writes a product burst pattern at one-third track pitch intervals by following the initial three-burst-per-two track burst pattern without determining write element width or read element width, so long as write-to-read offset is determined.

One further object of the present invention is to extend the useful service life of servowriters over a number of generations of disk drive products wherein each generation has a track density increased from a prior generation, without need for upgrading the servowriter to match the highest or latest track density layout or design.

Yet one more object of the present invention is to produce a servo format with sufficient PES linearity to enable use of very narrow magnetoresistive read elements relative to writer width (e.g., less than 40 percent of track pitch) without increasing servowriter time.

Yet another object of the present invention is to transfer a significant portion of disk drive servowriting activity from an expensive servowriter environment to the disk drive within a less expensive drive self-scan environment, resulting in disk drives made at less expense and with greater reliability.

Still another object of the present invention is to servowrite a family of hard disk drives having heads characterized by wide reader/writer tolerances in a manner which optimizes manufacturing utilization of clean room servowriters by having each disk of the family self-write at least significant portions of a final embedded servo burst pattern on each storage surface in accordance with particular head characteristics within each drive.

In accordance with principles of the present invention, a method for servowriting a magnetic hard disk of a head-disk assembly comprises the following steps:

- servo-writing a reference servo burst pattern using a servowriter coupled to the head-disk assembly at a servo-writing station within the disk drive manufacturing operation,

- completing assembly of the disk drive by attaching and connecting an electronics board to the head-disk assembly within the manufacturing operation,

- transferring the completed disk drive to a burn-in rack,

- transferring certain self-servo-write control software to the disk drive, and
- operating the disk drive at the burn-in rack to self-write at least a portion of a final servo burst pattern by using the reference burst pattern written to the head-disk assembly by the servowriter. In this regard, the disk drive may self-write intermediate servo bursts patterns which are used to self-write the final servo burst pattern in order to take into account write-to-read offset from a rotary positioner of the disk drive.

In a related aspect of the present invention, a magnetic hard disk drive has at least one data storage disk rotated by a spindle motor and at least one head transducer comprising an inductive write element and a magneto-resistive read element and positioned at radial track locations defined on a storage surface of the disk by a head positioner. Upon final assembly the disk drive includes a write/read channel connected to the head transducer, a spindle driver for driving the spindle motor, a positioner driver for driving the head positioner, an interface for connecting the drive to an external computing environment and including a cache buffer, and a drive controller for controlling at least the head positioner to position the head transducer at selected data tracks. In this example of the invention the disk drive has reference servo patterns recorded onto at least a part of the storage surface by a servo writer as a part of a manufacturing process, the reference servo patterns being incomplete with respect to a final product pattern. After final assembly the disk drive is loaded with and executes self-servo-writing software for self-writing embedded servo final product patterns across the storage surface based upon the reference servo patterns. The reference servo patterns may be part of the final product pattern, or they may be discarded and overwritten. In addition, intermediate servo burst patterns may be written for some tracks in order to compensate for write-to-read offsets and/or differences between relatively wide write element magnetic width (e.g. 66-120% of track width) and relatively narrow read element magnetic width (e.g. 35-75% of track width). Calibration processes carried out within the self-servo-writing process determine the need for, and location of, any intermediate servo burst patterns. Phase coherent servo fields including track number information may also be included within the reference servo patterns and the final product servo patterns.

In one more example including principles of the present invention, a disk drive comprises a magnetic data storage disk having a storage surface defining an embedded servo pattern. The drive also includes a head transducer comprising a magnetic write element having a magnetic writing width in a range between 66% and 120% of nominal track width, and a magneto-resistive read element having a magnetic reading width in a range between 35% and 75% of the nominal track width, and a head positioner for positioning the head transducer relative to concentric data storage tracks further defined on the storage surface. In this

example the embedded servo pattern includes for each pair of adjacent data tracks a six servo burst pattern of circumferentially sequential, radially offset untrimmed bursts A, B, C, D, E and F. A four servo burst pattern per track employing trimmed bursts may also be employed with slightly less tolerance for head width variances; however, the drawback of trimming and writing bursts in the same pass is that there is less randomness along each trimmed burst edge and therefore higher written-in repeatable runout ("RRO").

These and other objects, advantages, aspects, and features of the present invention will be more fully appreciated and understood upon consideration of the following detailed description of preferred embodiments presented in conjunction with the accompanying drawings.

Referring to Figs. 1-2, wherein like reference characters designate like or corresponding structural elements throughout the views, a head-disk assembly (HDA) 10 includes at least one data storage disk 12 having at least one major surface carrying a magnetic coating or deposition for storing user data in concentric data tracks defined thereon. The disk 12 is rotated at a predetermined angular velocity by a disk spindle motor 14. A data transducer head structure 15 includes an air bearing slider carrying a relatively wide write element 17 and a relatively narrow read element 19. The write element 17 is inductive, whereas the read element employs magneto-resistive principles (e.g. AMR, GMR, or more advanced head technology, e.g. "colossal magneto-resistive" principles). The head structure 15 is gimbal-mounted to a distal end of a head arm 16 so that the slider is free to follow closely above (one micro-inch or less) the disk surface upon an air bearing as is known in the art. A proximal end of the head arm 16 is journal mounted to a base of the HDA 10 and rotated relative to the disk surface by a rotary voice coil actuator motor 20. The distal end of the head arm 16 may include a suitable micro-actuator 18 thereby realizing a dual-stage actuator head positioner. Micro-actuators are shown in the Mori et al. U.S. Patent No. 5,189,578 referenced above, and also in U.S. Patent No. 5,867,347 to Knight et al., entitled:

"Head Suspension with Stacked Coil Microactuator for Tracking Axis Adjustment of a Read/Write Head", for example. Typically, the completed HDA will include a preamplifier, head selector, write driver integrated circuit 21 which is mounted as close to the head 15 as practical in order to maximize signal to noise during readback operations.

In Fig. 1 the assembled HDA 10 is within a clean room 30 at a servowriter station 32 and placed in registration with alignment pins 11. The HDA 10 includes an opening formed in a base wall, sidewall or cover plate for admitting a mechanical or virtual (e.g. optical) push-pin 34 of the servowriter 32. The push-pin 34 has an engagement end which engages the actuator arm 16 and another end coupled to a retro-reflector 36. The retro-reflector 36 reflects a laser beam back to a laser optics unit 38 within the servowriter 32. The laser optics unit 38 uses conventional laser interferometry techniques to determine precise relative location of the retro-reflector 36 relative to reference pins 11 and thereby indirectly determines relative position of the push-pin 34 and actuator arm 16 relative to the disk 12. This relative position information is fed into an actuator push-pin controller unit 39 which controls position of the push-pin 34 and thereby controls position of the actuator head arm 16 during servowriter aided servowriting operations.

In accordance with principles of the present invention, the servowriter 32 controls the spindle motor 14, the actuator motor 20 and the head 15 via circuit 21 in order respectively to rotate the disk 12, position the actuator 16, (and micro-actuator 18, if a dual-stage actuator is present), and write and check phase-coherent digital servo information fields 23 and servo burst patterns to the disk 12. An initial reference servo burst pattern 22 of radial servo reference bursts A, B, and C is recorded by the relatively wide inductive write element 17 of the head 15 under the control of the servowriter 32. As servowritten, the initial reference servo burst pattern 22 comprises an untrimmed three-burst pattern. As written, the initial servo burst reference pattern is sufficient to enable the read element 19 of head 15 to servo at some, but probably not all, locations within any particular data track defined on the data surface, depending upon the reader and writer element widths. Most preferably, the initial servo burst reference pattern provides sufficient

information to enable serving over a sufficient area so that only a single set of intermediate bursts is needed to produce the final product servo bursts for all tracks. However, if needed in certain situations, it remains practical to provide multiple sets of intermediate bursts in order to achieve a final product servo burst pattern.

After the initial servo burst pattern 22 is written at the servowriter station 32, the HDA 10 is sealed relative to the ambient (as by placement of a protective stickers over e.g. the push-pin opening and a clock track head opening in the base wall, sidewall or cover plate). The sealed HDA 10 is then moved from the clean room environment to an assembly station at which a drive circuit board 50 carrying disk drive electronics may be mounted to and electrically connected to the HDA 10. The drive circuit board typically includes a read/write channel 51, a spindle and actuator motor driver chip 53, a cache buffer memory array 55, and a digital controller chip 57 including an embedded programmed digital microprocessor core 58 and an interface 59. More or fewer chips may actually be included on the board 50, depending upon the particular circuit integration at the chip/board level.

In the Fig. 2 view, a drive electronics printed circuit board 50 has been attached and to the HDA 10 and connected to the head 15 via preamplifier 21, spin motor 14, and actuator voice coil motor 20, and the read/write channel 51 is connected to the read and write elements of the head 15 via the circuit 21. A structurally completed hard disk drive 100 results. The completed disk drive 100 is then moved to a self-scan unit 52. The self-scan unit 52 includes a diskware download station 54 for downloading disk control software, including self-servo-write control software, from a central computer, e.g. to reserved tracks 41 for retrieval and execution by the drive's digital controller on the circuit board 50. These reserved tracks 41 may be completely servowritten to enable easier code writing for the completed hard disk drive 100. Alternatively, the disk control firmware can be stored in electrically programmable read only memory on the drive's circuit board 50, or it can be downloaded to the drive via a serial port facility included as an additional part of the drive electronics.

Alternatively, a special circuit board may be connected to the head 15 via preamplifier 21, the spin motor 14, and the actuator voice coil motor 20. This special circuit board would typically include the functions identified in association with the disk drive product circuit board 50 shown in Fig. 2, but would be specially adapted for drive self-servo-writing operation, and therefore typically be endowed with greater computing speed and capacity than the drive circuit board, enabling use of multiple self-written servo bursts and multi-rate servo pattern sampling techniques, etc., in order to self-write a final burst pattern. After the final product servo patterns are self-written, the special circuit board would be disconnected, and a drive circuit board 50 would be installed and connected, thereby completing disk drive assembly. Diskware download via the function 54 could then occur via the interface 59 or a separate serial port of the circuit board 50, or diskware could be downloaded via the specialized circuit board.

While the disk drive 100 is at the self-scan unit 52, a second, intermediate servo burst pattern 24 of bursts d, e and f (Fig. 7), may be self-written onto the disk 12 for some tracks, depending upon measured write-to-read offset, for example. The assembled drive 100 can remain at the self-scan station for several hours. As explained later on, the self-scan process may require up to one or more hours per head and surface to carry out the self-servowriting processes of the present invention. By the time the disk drive 100 leaves the self-scan unit 52, a final servo burst pattern 25 will have been self-written to the disk 12 at each product servo sector location.

Preferably, although not necessarily, original servowritten and/or self-written intermediate servo burst patterns not comprising the final product servo burst pattern, will be overwritten or DC erased, since these original/intermediate patterns are not needed for drive servo operation and therefore are located in storage areas which will later be used to store user data during normal disk drive operations. Also, bands of reference track patterns 40 (Fig. 7) and the disk self-servo-write software stored on reserved tracks 41 of disk 12, may be overwritten with control software downloaded via a diskware download process 54. The control software will be available for retrieval and use by the disk drive 100 during normal disk drive data storage and retrieval operations. Active portions of

the control software are held in reserved page areas of the buffer 55 and executed by the digital controller core 58 within the drive chip 57.

A drive head position servo control loop uses the final product embedded servo patterns written to each data storage surface, and structurally includes the read element 19 of a head 15 associated with a particular surface, the preamplifier chip 21, the read/write channel 51, the digital controller core within 57, the motor driver chip 53 and the voice coil actuator motor 20 (and micro-actuator driver if micro-actuators 18 are included as part of the head arm assembly 18). Various analog to digital converters and digital to analog converters are also included within the head position servo control loop as is well understood by those skilled in the art and therefore not described herein in any further detail.

An initial issue confronting the disk drive designer is whether to employ "trimmed bursts" or "untrimmed bursts". A trimmed servo burst is one in which a radial edge of the burst is DC erased during a subsequent pass of the write element at a displaced radial position relative to the disk. A trimmed burst pattern is shown in Fig. 3A wherein a servo burst A' has a lower radial edge which has been trimmed (the portion of the burst enclosed in the dashed line block has been DC erased) to be in alignment with the upper radial edge of an adjacent burst C'. It is possible to trim a previously written burst, such as burst A' during a single pass of the write transducer 17 along a servowriting path for writing the C' burst. However, it has been discovered that a repeatable runout error (RRO) was reduced by a factor of about a square root of two when an untrimmed burst pattern is used in lieu of a single-pass-trimmed burst pattern. It is believed that the burst null point for an untrimmed burst pattern is determined by non-repeatable runout error (NRRO) of two different servowriting passes (one pass for each burst written), while the burst-null-point for a trimmed pattern as shown in Fig. 3A is determined by the NRRO of a single pass (wherein the write element trims one burst and writes another burst). While the Fig. 3A trimmed-burst pattern could be written in a way to reduce its RRO by the $\sqrt{2}$ factor by requiring two passes for each burst: one pass to trim the previous burst and a second pass to write the burst, such approach would nearly double the servowriting time spent at the servowriter station 32.

Fig. 3B graphs a PES which is linear as a function of radial offset of the MR reader element 19 about a centerline (A-C) passing through the aligned edges of the A' and C' trimmed bursts. If the writer element 17 is about 2/3 of a track wide, then the PES linearity signal should be about the same for trimmed or untrimmed servo bursts. However, for writer elements 17, which have electrical writing widths greater than about 2/3 of the track width, the useable portion of the PES curve is larger for untrimmed bursts. Figs. 3A and 3B show the A'-C' burst amplitude difference (PES) as a function of radial displacement of the MR read element 19 for the two trimmed bursts A' and C'. The idealized curve presented as Fig. 3B has a linear portion, bounded on both sides by flat lines. The useable portion of the Fig. 3B curve is simply the linear portion of the curve.

Figs. 4A and 4B show an equivalent situation for untrimmed bursts A and C. The linear portion of the Fig. 4B curve, centered about (A-C)=0, is smaller than that of the trimmed burst pattern, but the useable, non-flat portion of the Fig. 4B curve extends over a larger radial displacement of the MR read element 19 relative to the disk. If a PES linearization method is used to re-linearize the PES within the drive servo loop, then the Fig. 4A untrimmed burst pattern has a larger useable region.

In some cases it may be useful to provide bands 40 of one or more reference tracks radially distributed across the storage area of disk 12. Fig. 5 shows e.g. 5 data track zones from an outside diameter (OD) of the disk 12 to an inside minimum usable diameter (ID) of the disk 12. In between OD and ID are e.g. six bands of reference tracks 40. A pattern of e.g. six reference tracks 40 is shown in Fig. 7. While six reference tracks 40 are shown in Fig. 7, other numbers of zones and reference tracks may be employed, it being generally understood that a greater number of zones is preferred over a fewer number of zones. The reference tracks 40 may include multiple sets of bursts, and the bursts may be longer than the final product bursts in order to improve PES signal to noise ratio. The reference tracks 40 are written with the aid of the servowriter 32 and enable the servo loop of the disk drive 100 to measure position error signal (PES) gain, reader to writer lateral offset across the disk, reader to writer circumferential

ffset, and reader width relative to writer width, for example. Also, as an alternative implementation of the present invention, it is practical to format and reserve e.g. one or more diskware data tracks 41 generally, but not necessarily, at the OD of the disk 12, for storing drive diskware which will be needed and executed during the self-servowriting operations at the self-scan station 52. Then, the drive 100 will self servowrite all of the servo bursts of tracks lying between the fully formatted diskware tracks 41 and the reference tracks 40 to create the final servo sector pattern 25. Once PES gain and write-to-read offset measurements are taken and used in deriving the self-written servo burst patterns 26, the reference servo tracks 40 may be converted into regular data tracks, since the completed disk drive 100 will be able to servo accurately at any track radial location, and the reference tracks 40 are no longer needed for disk drive servo operations.

Fig. 6 shows one example of a servo pattern comprising servo bursts 22 and phase-coherent digital information 23 written with the aid of the Fig. 1 servowriter 32 and the write element 17. Four nominal servo track centerline locations are shown, Servo Tk₀, Servo Tk₁, Servo Tk₂, and Servo Tk₃, and four nominal data track centerline locations are also shown, Data Tk₀, Data Tk₁, Data Tk₂, and Data Tk₃. In the Fig. 6 example, the servo track centerlines have a pitch, which is two thirds the pitch of the data tracks. The dotted horizontal lines of Fig. 6 represent progressive head position loci at one-third data track pitch. Each servo track has a pitch, which is two-thirds of the pitch of each data track in this present example. Selected loci may be followed by the writer element 17 during writing of the phase-coherent digital information 23 and the untrimmed servo bursts 22 under direct control of the servowriter 32. Complete servo-writing of each data track at the servo writer would require two passes of the writer element 17; however, in accordance with principles of the present invention, only one pass per servo track is required at the servowriter in order to write the initial burst patterns needed for self-writing the final patterns and any intermediate patterns that may be required. In practice, thousands of concentric tracks are typically defined from an outer diameter (OD) to an inner diameter (ID) of the disk 12.

In the Fig. 6 example, the write element 17 is slightly greater than two-thirds of the width of each data track Tk, and the reference servo burst pattern 22 most preferably comprises three "untrimmed" servo bursts A, B, and C, written during three passes across two adjacent data tracks. The final servo burst pattern, shown in Fig. 10, comprises a three pass-per-track, untrimmed six servo burst pattern. Each final product servo sector 25 preferably includes the servo-writer aided digital fields 23, the servowriter aided bursts A, B, C, of pattern 22, and the self-written servo bursts D, E and F of pattern 26. Alternatively, all of the servo bursts may be rewritten in self-scan in order to improve RRO, at the expense of additional time at the self-scan station.

In accordance with principles of the present invention, the self-written servo bursts D, E and F of pattern 26 are self-written at one-third track pitch offsets from the servowriter aided untrimmed bursts A, B and C without the need to perform time consuming writer and reader width determinations. This advantage is illustrated in Fig. 8. In this example, the read element 19 follows a centerline locus of equal relative amplitudes of the A and B bursts. In the track-following position illustrated in Fig. 8 (where the write-to-read offset is zero), the head 16 places the write 17 at exactly one-third track pitch below a track boundary defined as an upper edge of the servowriter aided untrimmed burst A. This desirable head position for self-servowriting burst D is established mathematically, as follows:

$$\begin{aligned} w - d - (w/2) &= w - (w - 2/3 * TW)/2 - (w/2) \\ &= w - (w/2) + (1/3 * TW) - (w/2) \\ &= 1/3 * TW, \end{aligned}$$

where w: write element width,
 d: (w - (2/3 * TW))/2 (offset distance from A-B centerline using
 untrimmed burst pattern, and
 TW: track width.

While previous disk drive designs have used three pass-per-track, trimmed four burst patterns, and two pass-per-track untrimmed four-burst patterns, use of the final servo pattern 25 shown in Fig. 10 has been discovered to enable use of the largest possible variation in the width of both the thin film inductive writer

element 17 and of the thin film MR reader element 19. Accordingly, by using the Fig.10 final serv pattern, writers of electrical width in a range between 66% to 120% of the nominal track width, and readers of electrical width in a range between 35% and 75% of the nominal track width, may be used, (with an additional constraint that the width of the writer element 17 will always be greater than the width of the MR reader element 19). One consequence of using untrimmed bursts in a three pass-per-track approach is that the six final servo bursts, A, B, C, D, E, and F, shown in Fig.10, are required in order to accommodate all possible writer widths.

In the Fig.10 example it should be noted that the centerlines of the data tracks are determined by the drive controller 57 at radial points satisfying the following relationship: $\{(C-A) - (D-E)\} = 0$. For most reader widths within the useable range described above, these relationships usually produce a position error signal (PES) which includes information from four bursts in the vicinity of write track centerline, resulting in reduced RRO and PES demodulation noise within the head position servo control loop of the disk drive 100. For some heads with very narrow reader elements useful fine position information is available only from two servo bursts per servo wedge. For those narrower heads the TMR will be worse but off-track read capability ("OTC") of such heads should be better. Also, when only two bursts can be used by a particular head, the track centers for all tracks read by that head can be moved to the two-burst null point from the nominal four-burst null point.

While the Fig.10 pattern essentially requires three separate writes for each data track, one write per each dashed horizontal line, Fig. 6 demonstrates that it is practical to write all of the digital information as well as the first three bursts A, B, and C by writing once every two-thirds of a data track (one write per two of the dashed horizontal lines). However, a drive 100 written with a pattern shown in Fig. 6 probably cannot servo well at all locations along the radial stroke of the head position actuator 16. For example, if the width of the MR read element 19 is less than about 50% of a track width, and the width of the write element 17 is 66% of a track width, then the PES will have a flat region or null in the vicinity of the centers of the B bursts. With some combinations of reader-width, writer-width

and write-to-read offset, the drive can servo sufficiently accurately to write the D, E and F bursts of pattern 28 of the Fig. 10 final servo pattern in self-scan. A set of conditions under which direct writing of the final servo pattern is possible is:

- 1) the width of the read element is greater than 33% of the data track pitch;
- 2) the width of the write element is less than 133% of the data track pitch;

and

3) the write-to-read offset is less than 16.7% of the data track pitch. While the first two conditions are liberal, the third condition is very restrictive to count on for all heads at all operating skew angles. For the situation where the read/write offset is beyond 16.7% of the track pitch, the self-servowriting operation is carried out in two steps.

As shown in Fig. 9 a first self-servowriting step causes an intermediate burst pattern 24 of bursts d, e, and f to be written at an offset of $\pm 16.7\%$ of a data track. As long as the first two conditions listed above are met (limiting minimum reader width and maximum writer width) there will always be a way for the drive to servo using either adjacent radial edges of two of the original bursts 22 or adjacent radial edges of two of the intermediate bursts 24 in order to write the final bursts D, E and F of the pattern 26 shown in Fig. 10. It should be noted that for large write-to-read offsets, the servo bursts used might not be the same as the bursts used for small offsets.

As explained above in connection with Figs. 3A, 3B, 4A and 4B, by "untrimmed" is meant that the burst widths correspond to the effective electrical width of the write element 17, and no attempt is made to DC erase the burst edges in order to trim or adjust burst widths to a nominal reference width. It will be further understood that while a single radial burst pattern 22 is shown in Fig. 6, in practice a plurality of servo bursts are written in servo spokes extending around the disk 12. Typically, there may be as many as 90 to 150 or more servo wedges or spokes defined on disk 12, depending upon particular disk drive design considerations. The greater the number of servo spokes of a particular drive design, the greater will be the number of servo bursts.

While writing the Fig. 6 servo burst pattern, the push pin 34 of servowriter 32 guides the actuator arm 16 while the write element 17 of the head 15 writes multiple copies of the reference bursts 22 and multiple copies of phase-coherent digital servo information 23 including, for example, a sync field, a servo address mark field (which may include an index mark in one sector to mark a once-per-revolution fiducial location), a track number field, and a servo number field. The digital spoke information fields 23 are coherent from track to track, meaning that the reader 19 of head 15 can read, and the read channel 51 and drive servo controller 57 can decode, this information irrespective of some head misalignment with any particular data track centerline location. The digital spoke information 23 provides coarse positioning information needed for determining head position during track seeking operations, while the final servo burst pattern 26 will provide fine head positioning information enabling the head to be controlled precisely at a read element centerline of a data track being followed for reading, or for following a write element centerline of a data track being followed for writing user data.

In some instances it may be desirable to relax the reader/writer width tolerances and/or increase the write-to-read offset beyond the 1), 2) and 3) limits set out above. In such case, it is practical for the disk drive 100 to self-write a second intermediate servo burst pattern before self-writing the final burst pattern. Accordingly, the original reference burst pattern 24 laid down with the aid of the servo-writer 32 and the two intermediate patterns are self-written by the drive 100 at the self-scan unit 52 and used to develop the final product burst pattern. The final pattern may be a six burst untrimmed pattern, per Fig. 18, or it may be a four burst trimmed pattern, or other suitable burst pattern providing robust and reliable, linearizable PES across the stroke of the rotary actuator 16 in light of drive-specific reader/writer widths and write-to-read offset.

As shown in Fig. 2, the assembled disk drive 100 includes read channel 51 within the electronics and drive controller circuit board 50. In some instances, the read channel 51 may be limited to reading and capturing relative amplitudes of a finite number of servo bursts, following reading and decoding of the digital information fields 23. For example, in some read channel chip architectures, the read/write channel chip may not be able to read and utilize the digital information

fields 23, write the servo burst fields 22, 24 and/or 26 and then demodulate the bursts within a single servo sector interval. Because of this limitation, a modified self-servo-writing approach may be followed in order to achieve the desired final self-written servo pattern 25, with minimized use of factory servowriters, such as servowriter station 32 of Fig. 1.

Turning now to Fig. 11, a presently preferred servowriting sequence calls first for the servowriter station 32 to aid in writing the digital information field 23 and the reference servo burst field 22 as a first reference servo sector pattern 25A, and aids in writing a second digital information field 23A and reference servo burst field 22A as a second reference servo sector pattern 25B. Reference tracks 40 as shown in Fig. 7 may also be written under the control of the servowriter station 32. As shown in Fig. 12, after the drive 100 is assembled and transferred to the self-scan station 52, the drive self-writes the intermediate burst pattern 24 of bursts d, e, and f, at e.g. a 16.67% track pitch relative to the reference burst pattern 22 at a location immediately following the first reference pattern 22 in the servo field 25A. Next, as shown in Fig. 13, the final product burst pattern field 26 of bursts D, E, and F is self-written by the drive 100 immediately following the second reference burst pattern 22A within the second servo sector 25B. Then, the original servo pattern 25A can be DC erased or overwritten with user data, since it is not needed for proper disk drive operation and therefore will ultimately lie in a user data storage sector of the disk storage surface.

A rough estimate of time (T_H) required to self-servowrite one data surface of an exemplary 3.5 inch disk drive having a track density of 16,000 tracks per inch, a spindle rotational speed of 90 Hz, a full radial actuator stroke of 0.9645 inches, 1.5 servo tracks per each data track, 14 disk revolutions per servo track during disk self-servowrite, and 3600 seconds per hour is:

$$T_H = (16000 * 0.9645 * 1.5 * 14 * 1/90) / 3600 \sim 1 \text{ Hour per Head.}$$

During the 14 revolutions for each servo track, approximately one revolution is required to seek to and settle at a next track, one revolution is needed to write each intermediate burst d, e, or f, one revolution is needed to seek and

settle at a position to write a final product burst D, E or F, eight revolutions are needed to collect RRO information in order for rejection of higher RRO harmonics, two revolutions are needed to compute burst correction values (BCVs) which are recorded and later combined with the digitized PES in order to cancel out positional error RRO present along the track locus being followed. The BCVs are initially stored e.g. in the drive's buffer memory 55 on circuit board 50. One final revolution is then needed to write the final product burst D, E or F within field 26 using the PES and BCV stored in memory for the particular sector location. More than 14 revolutions for each servo track may be required as RRO is improved by using BCVs to write intermediate as well as final burst patterns. BCVs may be recorded in a BCV field of the servo sector for use by the product servo system following manufacturing and delivery of the drive to the customer.

The BCVs may be determined over multiple rotations of the disk 12 while the head read element 19 follows the same radial actuator position (track locus). One presently preferred example of a method for calculating burst correction values is described in commonly assigned U.S. Patent No. 5,793,559 to Shepherd et al, entitled: "In Drive Correction of Servo Pattern Errors", the disclosure thereof being incorporated herein by reference. After the BCVs are calculated by the drive electronics 50, the values are applied to adjust position of the head arm 16 and head 15 as the final bursts D, E and F are written into each final servo sector. In this manner, the final self-written burst pattern 26 may have no worse RRO than an equivalent pattern written during a single pass using the servowriter 32. If the drive servo loop compensates for disk vibration and/or spindle NRRO during self-servowriting, the final servo burst pattern may actually have less RRO than the servowriter generated servo burst pattern. A preferred self-servowriting method calls for first writing all of the intermediate bursts d, e, and f, that the drive needs, and then going back and writing the final bursts, by collecting the RRO and processing the appropriate BCV data immediately before writing each final burst D, E or F.

In self-servowriting product servo bursts it is very important to maintain a design correlation between track centerline as determined by servo bursts and the track centerline of the digital servo information field. Therefore, low harmonic

RRO is followed by the disk drive servo loop's adaptive runout correction system, and high harmonic RRO is corrected for by using BCVs in writing the final burst pattern. For any written-in runout that is small compared to a track width, such runout is preferably ignored so that smoother bursts are written in order to define a more circular track locus.

Since self-servowriting time at the self-scan unit 32 is less precious than servowriter/clean room time, it becomes practical to speed up the disk rotation at the servowriter 32 in writing the initial reference burst pattern 22, and slow down the disk rotation at self-scan during writing of the intermediate burst pattern 24, and the final burst pattern 26. This approach also aids in reducing the amount of written-in repeatable run out in the final burst pattern 26.

Use of dual-stage actuators may provide practical enhancements in implementing the present invention. If the head positioner 16 is placed at a nominal cylinder track center, then a micro-actuator 18 associated with a particular head may be "steered" to follow a desired track locus.

Independent of any limitations of the drive read channel chip 51, it may be desirable to write a double servo reference pattern on the disk 12 to enable a double-sample-rate servo sector sampling arrangement during the self-scan self-servowriting operations. Double sampling of reference servo bursts enables the drive servo loop to do a better job of following NRRO during the self-servowriting process and results in less RRO in the self-servowritten bursts D, E and F. A double-sample servo rate presupposes that the disk drive control electronics has sufficient computational speed and data processing capability in order to make the necessary RRO and BCV calculations without unduly incurring additional disk rotational latencies in carrying out the required computations. A special purpose high speed computer may be used in this case in lieu of the product electronics board 50 in order to control the head-disk assembly 10 during self-servowrite.

While stagger servowriting and bank servowriting techniques are known, it is presently preferred to employ a staggered self-servowriting process, which

progresses from head to head (surface to surface) along the disk stack. Stagger servowriting means that the servo patterns of the storage surfaces of the drive are progressively written (circumferentially staggered) during a single revolution of the disk. This approach is sometimes employed to minimize time at the servowriter station 32, but when used in accordance with principles of the present invention, this approach can result in significant offsets between the center of track as defined by the bursts and the center of a track as indicated by a track number within the coherent digital information fields 23. This offset can be calibrated by following various off-track positions in the vicinity of the nominal track and noting how the track number value varies with each offset. It is necessary to calibrate this offset to be within a small fraction of a servo track pitch (two-thirds of the data track pitch). If the calibration is off by too much, it could result in a discrepancy between a digital track number and a burst-determined track centerline such that the drive 100 writes data at the wrong track location, and thereby loses user data.

Bank servowriting calls for writing all data storage surfaces with servo information in parallel during a single revolution of the disk, and bank writing has another problem in addition to the offset problem noted with stagger servowriting. It is possible that the tangential skews between heads will change significantly when the disk drive is moved from the servowriter station 32 to the self-scan station 52. Actual measurements have shown that the tangential skew from a top head to a bottom head of a five-disk 3.5 inch, 5400 RPM drive can take as long as 2 microseconds. Any such skew would have to be accommodated by leaving space in the format for locating the bursts relative to the digital information fields 23. A conservative estimate of the necessary tolerance or "slop" time would be one half microsecond. Also, the burst timing skew (latency) relative to the digital fields 23 would have to be calibrated on a per-head, per-zone basis, so that the drive's servo control loop could properly demodulate the servo bursts and develop the PES. However, if dual-stage actuators are available for servo-control of each individual head position, and either if servo pattern offsets are employed between disk surfaces or if multiple read/write channels are simultaneously present, it may be practical to servowrite multiple storage surfaces simultaneously and with high accuracy, by having micro-actuator 18 canceling the effects of DC offsets and

learned NRRO at each storage surface being servowritten or self-servowritten, at a particular cylinder location of the disk stack.

One benefit in following a single head/surface self-servo-write is that the offset between burst-center and track-number center will be small enough to enable use within the final product servo pattern of the first three reference bursts, A, B, C which are written under direction of the servowriter 32, and use the self-servowriting process for writing only the three final burst patterns D, E, and F, as explained above. However as mentioned above, too large an offset between burst track center and digital track number centers (unless properly calibrated) can result in track number identification errors and lost data.

The Fig. 14 flow chart summarizes a disk drive manufacturing method 100 in accordance with principles of the present invention. The components and parts comprising the HDA 10 are received and inspected at a step 102, and then assembled into the HDA 10 within the clean room or clean environment 30 and tested at a step 104. Then, the tested HDA 10 is moved to the servo-writer station 32, still within the clean room 30 and initial reference servo patterns are written onto at least one disk surface by the write element 17 under direct control of the servo-writer 32 at a step 106. Then the HDA 10 is completely enclosed, sealed and removed from the servo-writer station 32 and the clean room 30.

At a step 110, the assembled drive printed circuit board is received and checked out electrically. The board is then merged with the HDA at a step 112 to complete the disk drive assembly process and then moved to a self-scan rack location. At a step 114, after the drive is connected to the self-scan unit 52, self-servo-write firmware is downloaded to the buffer 55 of the drive. Then, at a step 116, a number of critical calibrations are performed, including (but not necessarily limited to) radial and tangential write element to read element offset, PES linearization for each head 15, and torque constant (kt/T) over the actuator stroke. At a step 118 a pattern of intermediate servo burst sets, e.g. the bursts d, e, and f, is self-written by the drive to each storage surface, and a final set of burst patterns, e.g. the bursts D, E and F, is self-written to each storage surface at a step 120. The original/intermediate burst patterns may then be DC erased or overwritten with

test patterns at a step 122 subsequently during self-scan. Finally, the drive may be configured for a customer's particular requirements at a step 124, and packed and shipped to the customer at a step 126.

It is to be understood that the particular implementations described are intended as illustrations of, and not as limiting the scope of, the claims. It will of course be appreciated that in the development of any such actual implementation, numerous implementation-specific decisions must be made to achieve the developers' specific goals, such as compliance with system-related and business-related constraints and that these goals will vary from one implementation to another. Moreover, it will be appreciated that such a development effort might be complex and time-consuming, but would nevertheless be a routine undertaking of engineering for those of ordinary skill having the benefit of this disclosure.

Although the present invention has been described in terms of the presently preferred embodiment, it should be clear to those skilled in the art that the present invention may also be utilized in conjunction with, for example, other disk drive servowriting methods and patterns. Thus, it should be understood that the instant disclosure is not to be interpreted as limiting. Various alterations and modifications will no doubt become apparent to those skilled in the art after having read the above disclosure. Accordingly, it is intended that the appended claims be interpreted as covering all alterations and modifications as fall within the true spirit and scope of the invention.

4. Brief Description of Drawings

Fig. 1 is a highly diagrammatic plan view of a disk drive head-disk assembly located at a servowriter station within a clean room for servowriting a first reference burst pattern in accordance with principles of the present invention.

Fig. 2 is a view similar to the Fig. 1 view except that the head-disk assembly has been sealed and provided with a drive electronic circuit board to complete disk drive assembly, and has been moved to a burn-in unit, for self-writing a servo burst product pattern further in accordance with principles of the present invention.

Fig. 3A is a schematic representation of an MR read-element juxtaposed next to two radially offset, radially trimmed bursts; and Fig. 3B is a graph of burst amplitude difference as a function of MR read-element radial displacement from a burst-established track centerline for the Fig. 3A trimmed burst pattern.

Fig. 4A is a schematic representation of an MR read element juxtaposed next to two untrimmed, radially offset bursts; and Fig. 4B is a graph of burst amplitude difference as a function of MR read-element radial displacement from a burst-established track centerline for the Fig. 4A untrimmed burst pattern.

Fig. 5 is a greatly enlarged, planarized diagrammatic plan of a disk surface divided into five data zones spanned by six reference track regions each including one or more reference tracks recorded by using the Fig. 1 servowriter.

Fig. 6 is a greatly enlarged, planarized diagrammatic plan of a three-pass-per-two-data-track (1.5 pass per track) untrimmed reference servo burst pattern written at the Fig. 1 servowriter station.

Fig. 7 is a greatly enlarged, planarized diagrammatic plan view of untrimmed reference servo burst patterns written in a Fig. 5 reference track region at the Fig. 1 servowriter station.

Fig. 8 is a greatly enlarged, planarized diagrammatic plan view of the Fig. 6 three-pass-per-two-data-track untrimmed reference servo burst patterns wherein a null point between two bursts provides a servo reference location in a case where the writer to reader offset is zero, thereby enabling direct writing of intermediate and final servo burst patterns at one third pitch without writer width or reader width determinations in accordance with further principles and aspects of the present invention.

Fig. 9 is a plan view of the Fig. 6 reference track servo burst pattern and a pattern of intermediate untrimmed servo bursts self-written by the disk drive during self-scan.

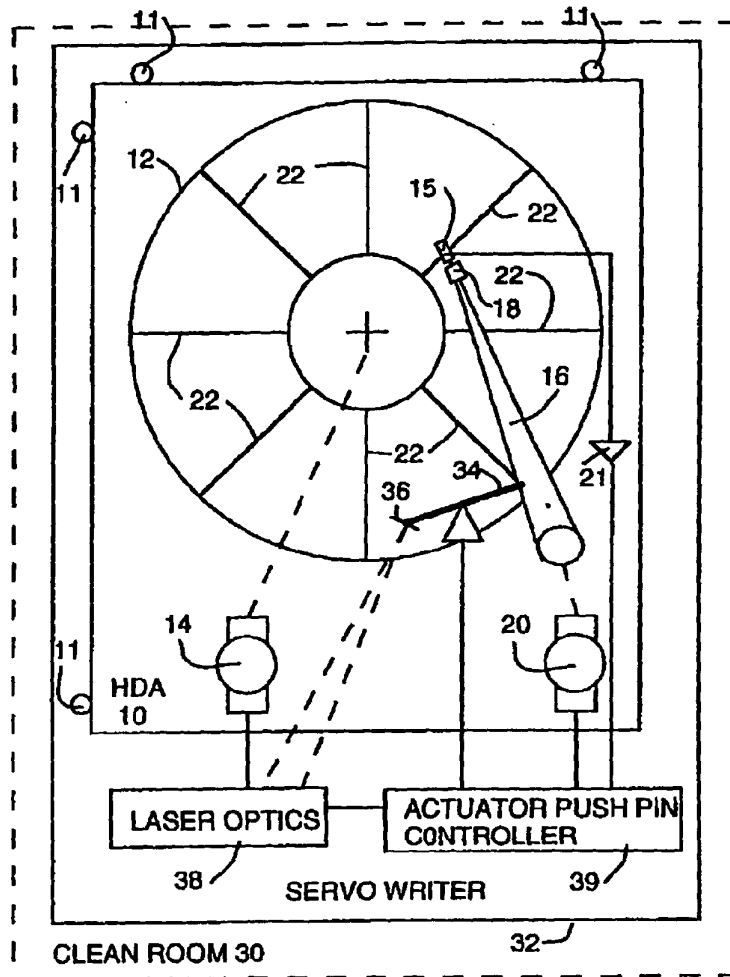
Fig. 10 is a plan view of the Fig. 9 pattern along with final untrimmed bursts self-written by the disk drive during self-scan (along with the intermediate bursts which are ultimately overwritten with user data patterns).

Fig. 11 is an alternative plan of two three-pass-per-data-track untrimmed servo burst patterns written with the aid of the Fig. 1 servowriter station, one of the patterns being a product digital data plus first servo burst pattern, and another one of the patterns being a reference pattern.

Fig. 12 is a plan view of the Fig. 11 reference track servo burst patterns and a pattern of intermediate untrimmed servo bursts self-written by the disk drive during self-scan.

Fig. 13 is a plan view of the Fig. 12 reference and intermediate servo burst patterns and a final untrimmed servo burst pattern self-written by the disk drive during self-scan.

Fig. 14 is a high level flow diagram of a disk drive manufacturing process in accordance with principles of the present invention.



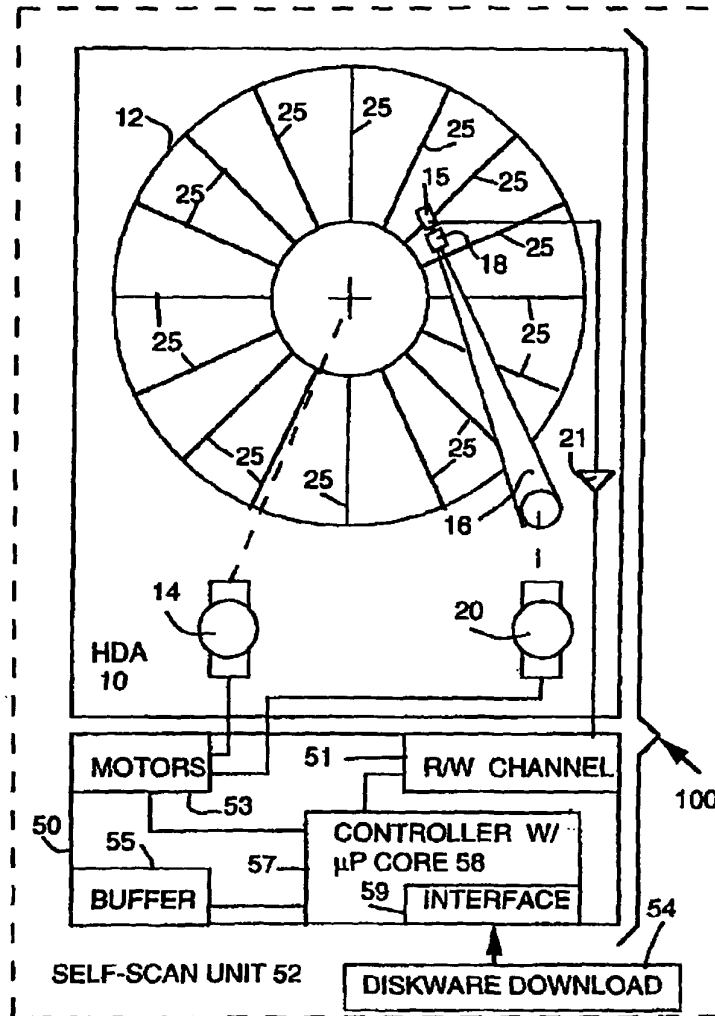
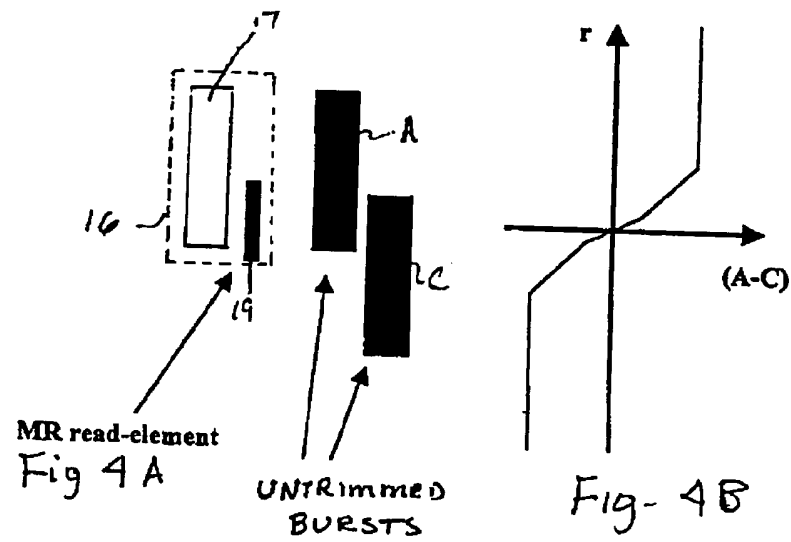
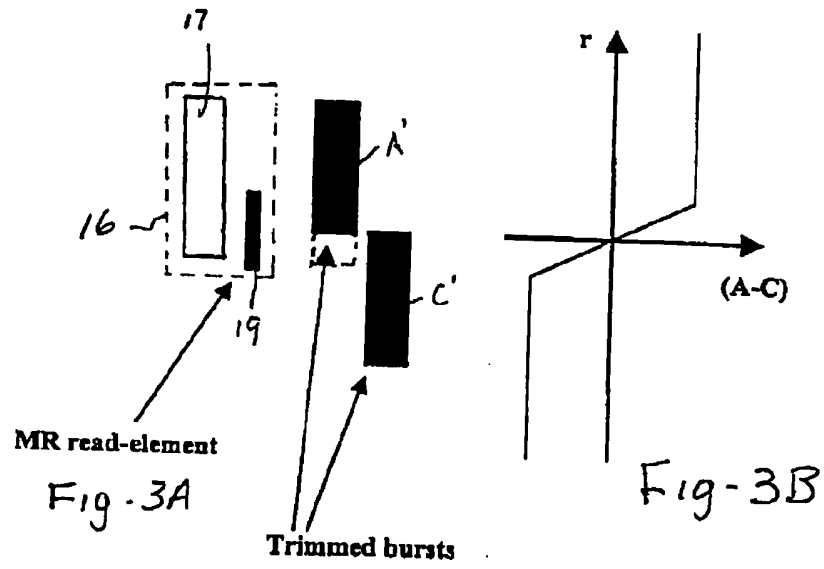
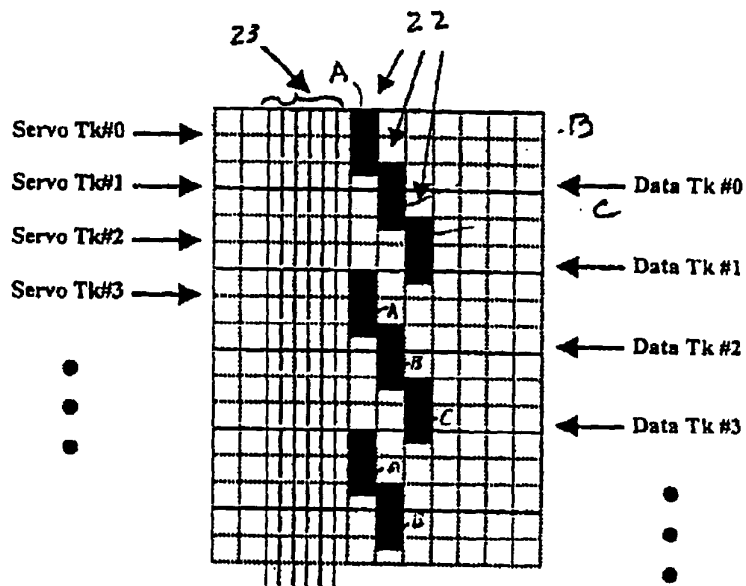
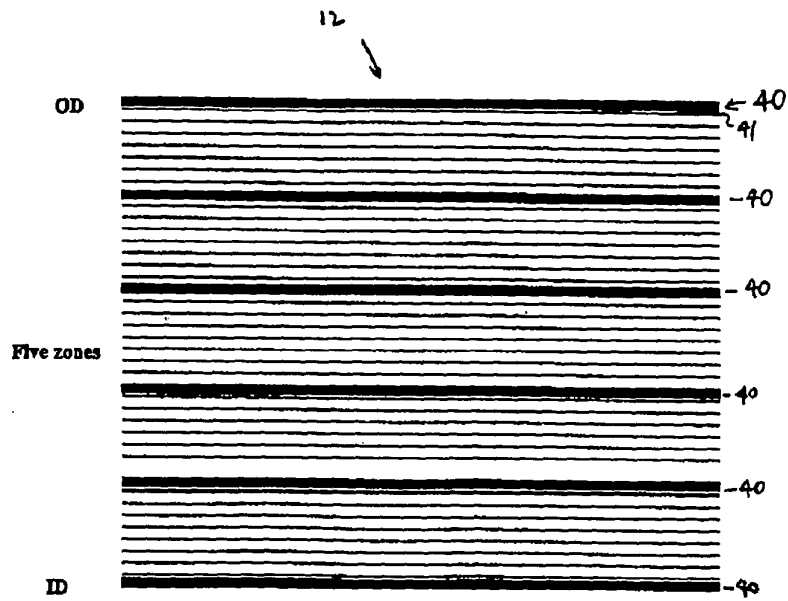


FIG. 2





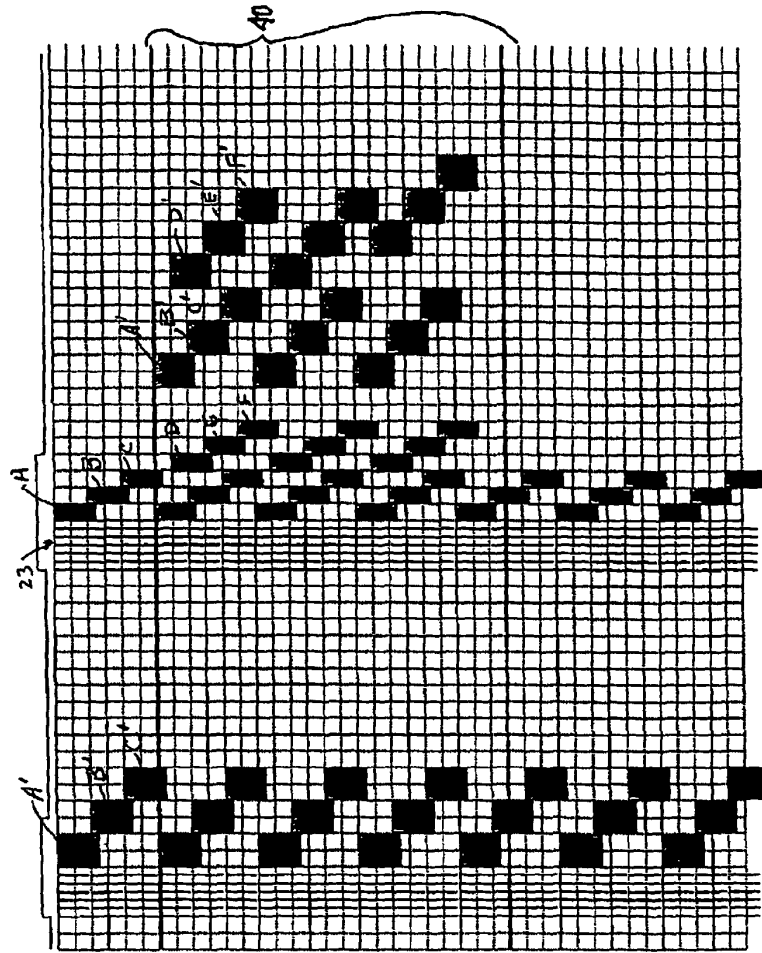


Fig. 7

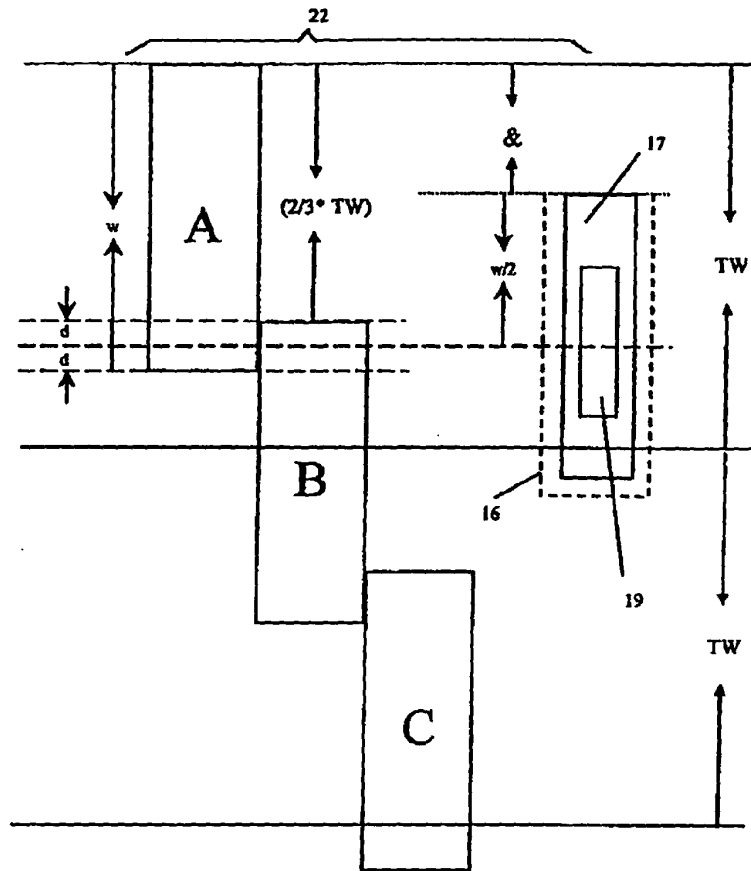


Fig. 8

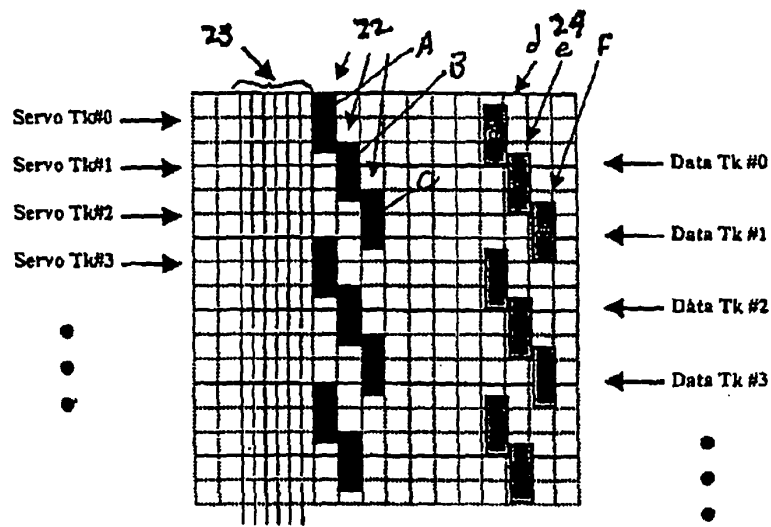


Fig. 9

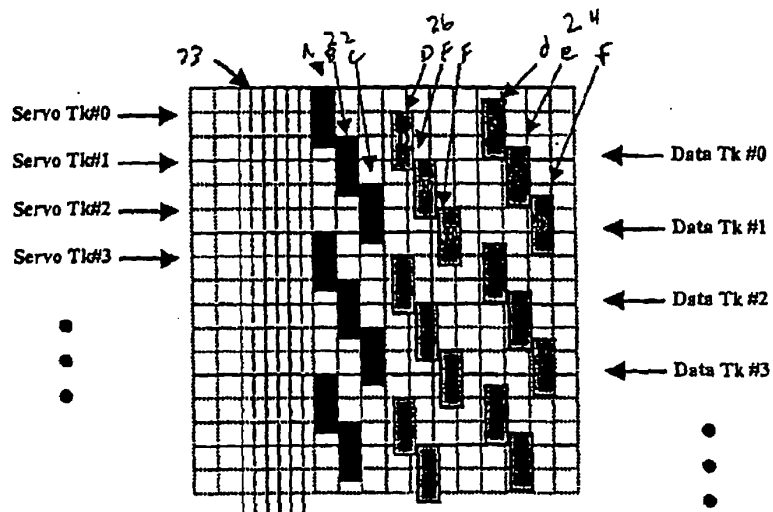
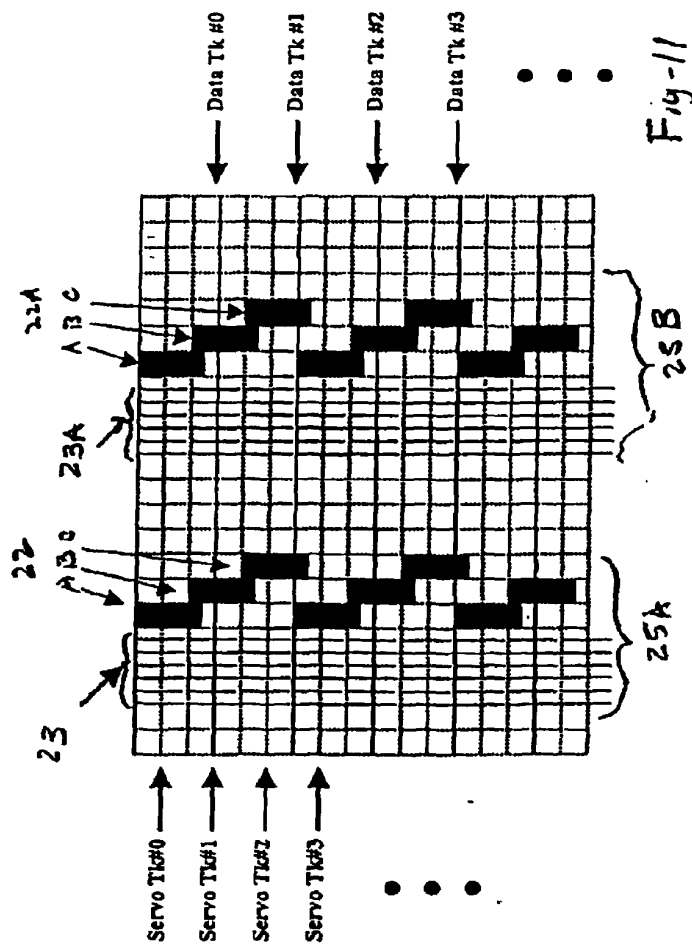
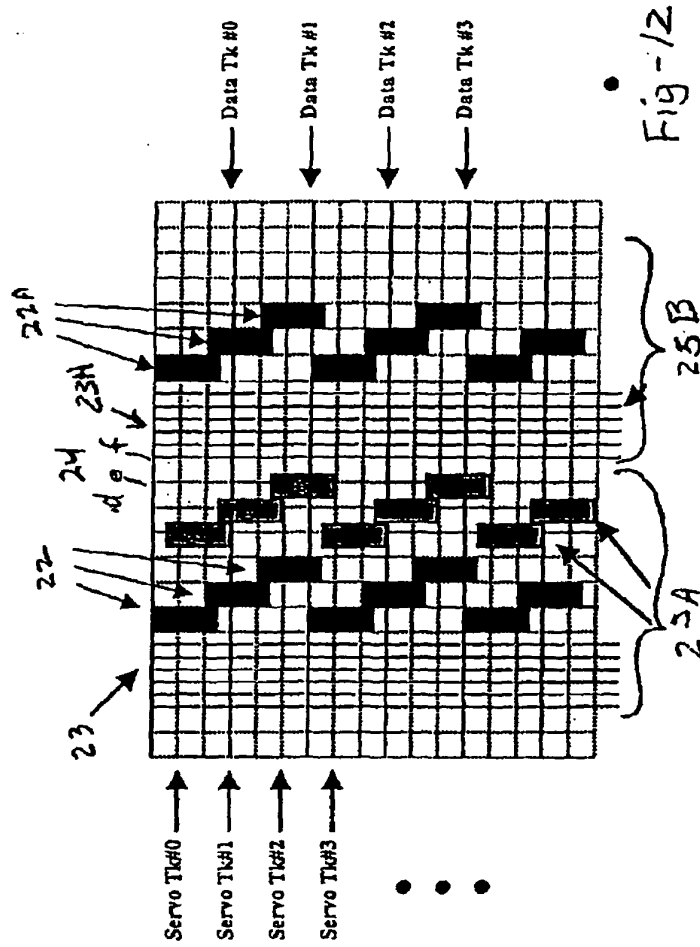


Fig-10





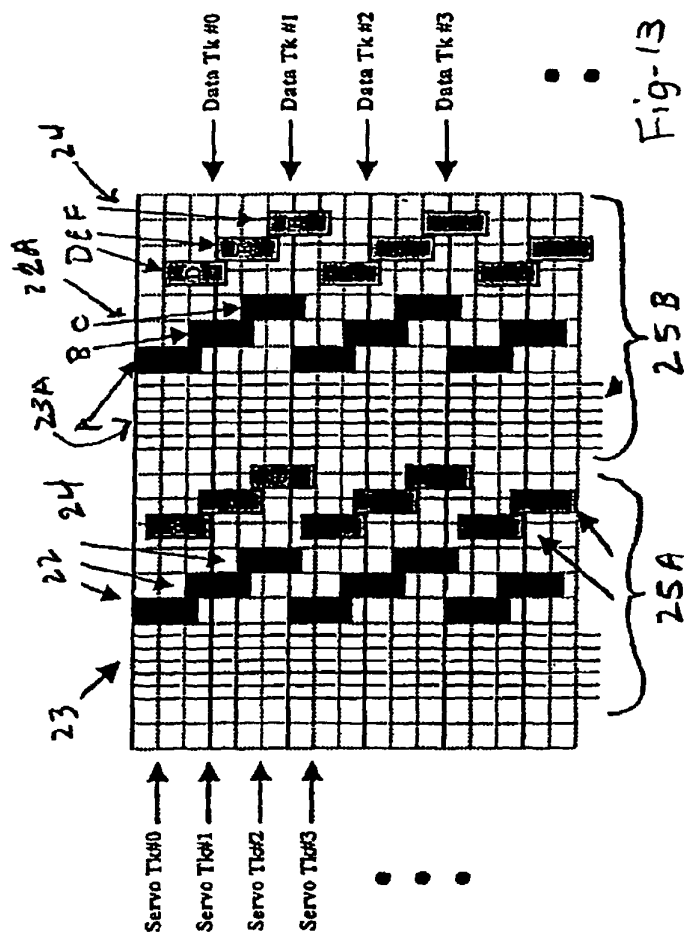
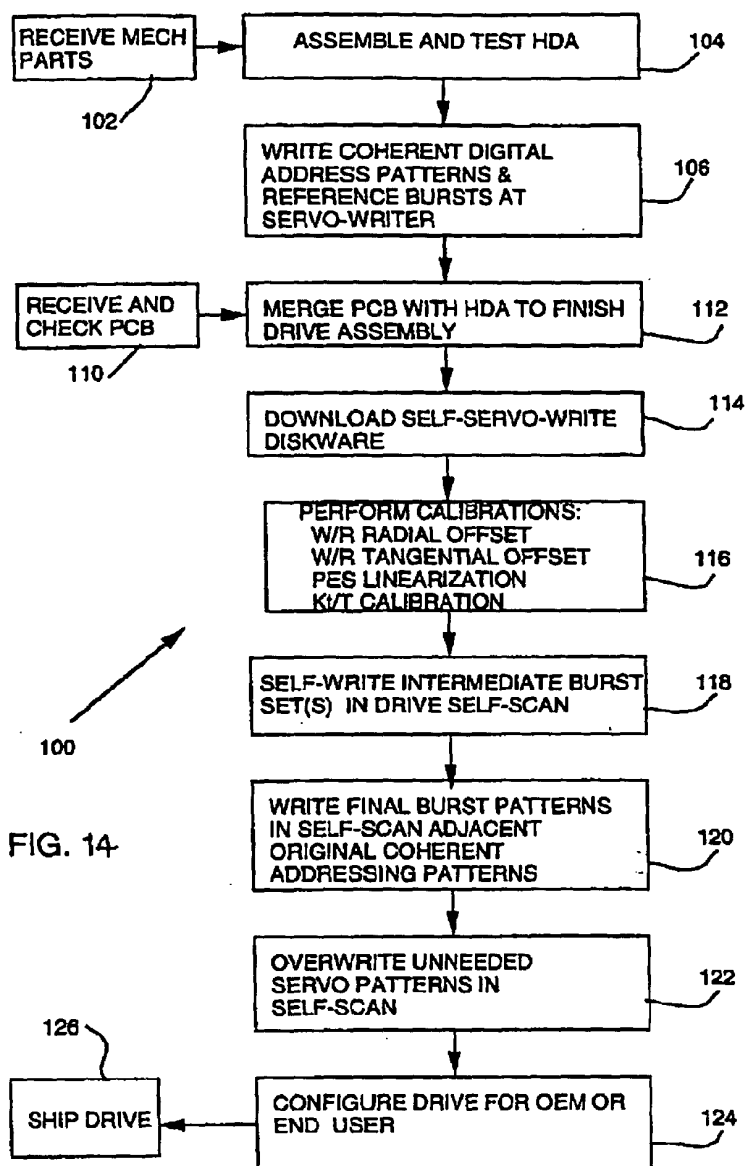


Fig-13



1. Abstract

A method for servowriting a magnetic hard disk drive includes servo-writing a first servo burst pattern by using a servewriter coupled to a head-disk assembly within a clean room environment, self-writing at least a second servo burst pattern radially offset relative to the first burst pattern by reading the first burst pattern without using the servewriter, and self-writing a final burst pattern by using the first burst pattern and the second burst pattern without using the servewriter. One or more intermediate burst patterns may be provided to accommodate writer/reader offset of dual element read heads in order to produce final product servo burst patterns. A disk drive having embedded servo sectors each including an untrimmed six-burst final servo pattern is also disclosed. The disk drive self-writes at least some of the final servo pattern.

2. Representative Drawing

Fig. 1